

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



**VELOCIDADES ELÁSTICAS DE EVAPORITOS DA BACIA SERGIPE-  
ALAGOAS**

**SIMONE NABUCO CORRÊA**

**MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO,  
COMO REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA TRABALHO  
FINAL DE CURSO (IGLU06)**

**RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL  
MAIO DE 2006**

VELOCIDADES ELÁSTICAS DE EVAPORITOS DA BACIA SERGIPE-  
ALAGOAS

SIMONE NABUCO CORRÊA

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO,  
COMO REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA TRABALHO  
FINAL DE CURSO (IGLU06)

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOFÍSICA

ORIENTADOR: JOSÉ AGNELO SOARES (UFRJ)

APROVADA POR:

---

EMÍLIO VELLOSO BARROSO, UFRJ

---

JADIR DA CONCEIÇÃO DA SILVA, UFRJ

---

JOSÉ AGNELO SOARES, UFRJ

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL  
MAIO DE 2006

## FICHA CATALOGRÁFICA

Corrêa, Simone Nabuco.

Velocidades elásticas de evaporitos da Bacia Sergipe-Alagoas. [Rio de Janeiro] 2006.

ix, 52p.: il.

Monografia (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, 2006.

Orientador: José Agnelo Soares (UFRJ)

1. Velocidade da onda P. 2. Velocidade de onda S. 3. Tomografia Ultra-sônica. 4. Evaporitos

- Monografia. I. Soares, J.A. (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia. II. Título.

RESUMO DA MONOGRAFIA APRESENTADA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO  
REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA TRABALHO FINAL DE CURSO  
(IGLU06)

VELOCIDADES ELÁSTICAS DE EVAPORITOS DA BACIA SERGIPE-ALAGOAS

SIMONE NABUCO CORRÊA

MAIO / 2006

ORIENTADOR: JOSÉ AGNELO SOARES (UFRJ)

SETOR: GEOFÍSICA

As rochas evaporíticas são formadas em ambientes de sedimentação de baixo aporte de terrígenos, submetidos a clima seco onde as taxas de evaporação das águas são elevadas, permitindo a formação de salmoura a partir da qual minerais evaporíticos se formam. São encontradas em muitas regiões do mundo e são um importante elemento constituinte das bacias sedimentares costeiras por sua freqüente associação com petróleo, como é o caso da Bacia de Sergipe-Alagoas. No entanto, suas propriedades mecânicas são pouco conhecidas, sabendo-se, contudo, que possuem algumas propriedades bem peculiares, como altas velocidades de propagação de ondas elásticas e, alguns evaporitos, capacidade de agirem como grandes atenuadores de energia. O presente trabalho mostra: (a) estudo de medidas uniaxiais de velocidades de onda P e S em quatro testemunhos de halita e quatro de silvinita; (b) a realização de tomografia elástica para onda P em três testemunhos de halita e três testemunhos de carnalita e; (c) uma medida uniaxial de velocidade de onda P em câmara de pressão hidrostática para um testemunho de carnalita. Todos os litotipos utilizados foram provenientes da Bacia Sergipe-Alagoas. Os testemunhos de halita e silvinita submetidos à medição de velocidade uniaxial apresentaram o seguinte resultado: velocidade de onda P variando entre 4316 m/s e 4409 m/s e velocidade de onda S variando entre 2564 m/s e 2774 m/s para o litotipo halita; velocidade de onda P variando entre 3484 m/s e 4005 m/s e velocidade de onda S variando entre 2183 m/s e 2609 m/s para o litotipo silvinita. As tomografias elásticas realizadas apresentaram velocidades de onda P mais altas para a halita e mais baixas para carnalita, coerentes com resultados de ensaios uniaxiais

apresentados na literatura, embora os tomogramas apresentem a capacidade adicional de mapear as variações internas de velocidade em um plano perpendicular ao eixo do testemunho e não apenas um valor médio de velocidade, como acontece com os resultados dos ensaios uniaxiais. A tomografia elástica permitiu ainda a identificação de feições lineares internas em testemunhos de halita e de carnalita, interpretadas como possíveis planos suturados de fratura, o que não foi possível de identificar através da tradicional técnica de tomografia de raios-x. Amostras de taquidrita apresentaram uma razão sinal/ruído muito desfavorável à realização de tomografias elásticas, indicando um elevado coeficiente de atenuação da onda elástica. Portanto, a medição da velocidade elástica da taquidrita somente pôde ser realizada em câmara de pressão hidrostática, sob pressão de 500 psi, apresentando velocidade de onda P igual a 3200 m/s.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carlos Alberto Miguel Corrêa e Telma Maria Nabuco, aos meus irmãos, Bruno Roberto Nabuco Corrêa e Cíntia Bermudes dos Santos e a minha prima Sandra Helena Nascimento Nabuco, pelo incentivo e apoio ao longo de todos esses anos.

Ao meu orientador, José Agnelo Soares, por ter transmitido para mim seus valiosos conhecimentos e experiências que proporcionaram a realização do presente trabalho e que colaboraram grandemente para o meu aperfeiçoamento profissional. Sou muito grata e desejo sinceramente que continue tendo muito sucesso.

A Companhia Vale do Rio Doce, por ter fornecido gentilmente as amostras de evaporitos que contribuíram grandemente para o desenvolvimento deste trabalho.

A Petrobras, por ter cedido gentilmente os testemunhos de evaporitos, e também, pela colaboração em realizar, no seu Centro de Pesquisa, as tomografias de raios-x nas amostras de halita e carnalita e a realização do teste de velocidade de onda P na câmara de pressão hidrostática, que contribuíram fortemente para o bom desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Laboratório de Petrofísica do Departamento de Geologia da UFRJ pelo apoio logístico e por ter cedido o tomógrafo ultra-sônico para a realização dos testes, contribuindo assim para o desenvolvimento e aperfeiçoamento deste trabalho.

A todos os docentes e funcionários do Departamento de Geologia da UFRJ, que contribuíram para minha formação intelectual e pessoal.

A todos os meus amigos que conquistei no período que convivemos juntos na universidade, em especial a Maria Luiza Verdan, Gilmar Pauli Dias e Luciana Santos de Oliveira por todo o apoio e incentivo que recebi ao longo do curso. Foi muito recompensador todo esse período que passamos juntos. Desejo sucesso para todos!

## SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Ondas Primárias (P) e Ondas Secundárias (S).....	3
1.2. Velocidades de Ondas Sísmicas.....	3
1.2.1. Fatores que afetam a velocidade.....	4
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Materiais.....	5
2. ASPECTOS DA GEOLOGIA REGIONAL.....	8
2.1. Tectônica e Sedimentação .....	8
2.1.1. Contexto Geológico da Formação de Depósitos Evaporíticos no Brasil, Especialmente na Bacia Sergipe-Alagoas.....	12
3. MODOS DE FORMAÇÃO DOS EVAPORITOS.....	13
3.1. Características Físico-químicas dos Evaporitos (Carnalita, Halita, Silvinita e Taquidrita).....	14
4. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES.....	18
4.1. Método Tradicional Unidirecional.....	18
4.2. Tomografia Ultra-Sônica.....	20
4.2.1. Tomografia Ultra-sônicas em Testemunhos.....	22
5. RESULTADOS.....	25
5.1. Velocidades Medidas no Sistema Unidirecional.....	25
5.2. Tomograma.....	35
6. CONCLUSÕES.....	48
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Testemunhos de evaporitos (halita e silvinita) com cerca de 3,8 cm de diâmetro provenientes da Bacia Sergipe-alagoas fornecidas pela Companhia Vale do Rio Doce. A halita tem uma textura bem fina enquanto que a silvinita é bastante granular.	6
<b>Figura 1.2.</b> Testemunhos de evaporitos (halita, carnalita e taquidrita) oriundos da Bacia Sergipe-Alagoas com diâmetro em torno de 9 cm. A halita apresenta-se com uma textura mais fina e mais compacta, a carnalita com uma textura mais granular e a taquidrita com uma textura bem fina e transparente.	7
<b>Figura 2.1.</b> Seção estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas (ANP,2006).	10
<b>Figura 2.2.</b> Coluna estratigráfica da Bacia de Sergipe (Carta, 2006).	11
<b>Figura 3.1.</b> Carnalita (foto: Joaquim Sanz / Museum of Geology Valentí Masachs – Carnalita, 2006).	14
<b>Figura 3.2.</b> Cristal de halita (foto: Joaquim Sanz / Museum of Geology Valentí Masachs – Halita, 2006).	15
<b>Figura 3.3.</b> Silvinita (Cardona, Barcelona – Minerales, 2005).	16
<b>Figura 3.4.</b> Taquidrita granular (Tachyhidrite, 2006).	17
<b>Figura 4.1(a).</b> <i>Pulser Receiver</i> – instrumento utilizado para a geração dos pulsos elétricos que serão enviados ao transdutor transmissor.	18
<b>Figura 4.1(b).</b> Osciloscópio – utilizado para fazer ampliações do sinal e facilitar a leitura dos tempos de primeira chegada das ondas.	19
<b>Figura 4.1(c).</b> Amostra de evaporito submetida ao teste de velocidade na direção de maior comprimento.	19
<b>Figura 4.2(a).</b> Visão geral do tomógrafo situado no Laboratório de Petrofísica da UFRJ (Soares, 2006).	20
<b>Figura 4.2(b).</b> Amostra de evaporito submetida ao ensaio de tomografia ultrassônica, contida na coroa de 32 pistões.	21
<b>Figura 4.2(c).</b> Visão mais detalhada da carnalita em contato com os 32 pistões do tomógrafo.	21
<b>Figura 4.2.1.</b> Esquema de disposição dos 32 eletrodos em volta do testemunho, com os respectivos 544 raios e as 408 células da malha de discretização (Soares, 2005).	24
<b>Figura 5.1.1(a).</b> De acordo com o gráfico acima, a amostra de halita (A1) apresentou velocidade de onda P igual a 4386 m/s. Esse valor foi gerado a	26



partir da relação entre o comprimento (mm) e tempo de propagação ( $\mu$ s) das amostras. Para a obtenção de  $V_P$  foram medidas amostras de quatro tamanhos diferentes.

**Figura 5.1.1(b).** Conforme o gráfico, a amostra de halita (A1) apresentou velocidade de onda S igual a 2593 m/s. Para a obtenção de  $V_S$  foram medidas amostras de dois tamanhos diferentes. A relação entre a variação do comprimento (mm) e o tempo de propagação da onda ( $\mu$ s) das amostras, gerou a reta da qual se calculou a velocidade. 27

**Figura 5.1.2(a).** Mediante o gráfico, a amostra de halita A2 apresenta velocidade de onda P igual a 4409 m/s. 28

**Figura 5.1.2(b).** Com base na relação entre comprimento e tempo de propagação da amostra, a halita A2 apresentou velocidade de onda S igual a 2774 m/s. 29

**Figura 5.1.3(a).** Mediante o gráfico, nota-se que a amostra de silvinita A3 tem velocidade de onda P igual a 4005 m/s. 30

**Figura 5.1.3 (b).** O gráfico acima revela que a amostra de silvinita A3 apresenta velocidade de onda S igual a 2357 m/s. 31

**Figura 5.1.4(a).** Como evidenciado no gráfico, a amostra de silvinita A4 apresentou velocidade de onda P igual a 3484 m/s. 32

**Figura 5.1.4(b).** A amostra de silvinita A4 apresenta velocidade de onda S igual a 2183 m/s. 33

**Figura 5.2.1(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica de onda P da amostra halita 1, mostrando velocidade em torno de 4000 m/s. 36

**Figura 5.2.1 (b).** Imagem de tomografia de raios-X para a amostra halita 1. Testemunho relativamente homogêneo, com efeitos de borda evidentes (Soares, 2006). 37

**Figura 5.2.2(a).** A imagem de tomografia ultra-sônica de onda P da halita 2 apresentou velocidade predominante para a rocha em torno de 4000 m/s. Observou-se um evento linear de alta velocidade na direção NE/SW, o qual foi interpretado como uma linha de sutura de uma fratura pré-existente. 38

**Figura 5.2.2(b).** Imagem de tomografia de raios-X da amostra halita 2. O tomograma apresentou alta resolução, identificando vazios milimétricos, mas sem identificar qualquer descontinuidade no material (Soares, 2006). 39

**Figura 5.2.3(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica da amostra de halita 3 apresentando velocidade de onda P predominante em torno de 4200 m/s. Também foi identificado um evento linear de alta velocidade. 40

**Figura 5.2.3(b).** Tomografia de raios-x sem evidência de heterogeneidade 41

para a amostra de halita 3, embora identifique a presença de pequenos espaços vazios no interior do testemunho (Soares, 2006).

**Figura 5.2.4(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica da amostra carnalita 1. Velocidade predominante em torno de 4000 m/s e sem evidência de descontinuidade. 42

**Figura 5.2.4(b).** Imagem de tomografia de raios-X da amostra carnalita 1. Valores de densidade variando bastante, provavelmente refletindo uma heterogeneidade composicional da amostra (Soares, 2006). 43

**Figura 5.2.5(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica com velocidades predominantes em torno de 3500 e 3800 m/s. Foi identificado um evento linear apresentando valores altos e baixos para a velocidade de onda P. 44

**Figura 5.2.5(b).** Tomografia de raios-X mostrando regiões da amostra da carnalita 2 que possuem valores bastante variáveis de densidade, sem apresentar nenhuma descontinuidade (Soares, 2006). 45

**Figura 5.2.6(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica da amostra carnalita 3. Nota-se duas regiões com velocidades predominantes, uma em torno de 3500 m/s e a outra cerca de 4000 m/s. 46

**Figura 5.2.6(b).** Tomografia de raios-x da amostra carnalita 3 mostrando uma variação substancial da densidade e sua maior resolução pela identificação de vazios (Soares, 2006). 47

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 5.1.** Valores de VP, VS e razão de Poisson ( $\nu$ ) nas amostras de halita (A1 e A2) e silvinita (A3 e A4). 33

**Tabela 5.2.** Valores de VP e VS nas amostras de halita (A5 e A6) e silvinita (A7 e A8) e os valores do razão de Poisson ( $\nu$ ). 34

## 1. INTRODUÇÃO

Os evaporitos são rochas sedimentares formadas em ambientes de sedimentação de baixo aporte de terrígenos, submetidos a clima seco onde as taxas de evaporação das águas são elevadas, permitindo a formação de salmoura a partir da qual minerais evaporíticos se formam. São encontrados hoje em muitas regiões do mundo, em ambientes que podem ser tanto de características continentais como marinhas, desde desertos até mares hipersalinos (Silva et al., 2001).

As rochas evaporíticas são um importante elemento constituinte das bacias sedimentares de margem continental, como é o caso, no Brasil, das bacias de Sergipe-Alagoas, Santos, Campos, dentre outras. A freqüente associação com petróleo, onde cerca de 70% dos campos de petróleo gigantes em rochas carbonáticas estão relacionados a depósitos evaporíticos (Warren, 1989), permite reconhecer a importância de se estudar e entender não só a geologia e sedimentologia dessas rochas como também suas propriedades mecânicas.

No entanto, as suas propriedades mecânicas são ainda pouco conhecidas, sabendo-se, contudo, que possuem propriedades elásticas bastante peculiares, como altas velocidades de propagação de ondas elásticas e, alguns evaporitos, agem como elementos absorvedores de energia dessas ondas. Dessa forma, há uma grande dificuldade em imagear a subsuperfície embaixo de camadas de sais através de métodos de investigação indireta, como é o caso do método sísmico. Além disso, eles apresentam um comportamento deformacional muito plástico, ou seja, apresentam altas taxas de deformação mesmo quando submetidos a pequenos acréscimos de tensão. Isto dificulta em muito a perfuração de poços em tais tipos de rocha, pois um poço perfurado, se não sofrer intervenção humana, é em poucas horas fechado pela própria deformação do sal.

Popp & Kern (1998) encontraram para amostra de halita submetidas à pressão de 5 MPa (em torno de 700 psi), velocidades que variavam entre 4,25 Km/s e 4,55 Km/s para ondas P e entre 2,47 Km/s e 2,65 Km/s para ondas S. Medições de permeabilidade em amostras de rochas de sal tem revelado valores extremamente baixos, geralmente inferior a resolução do sistema de teste ( $<10^{-20}$  m<sup>2</sup> ou  $10^{-2}$  mD).

Deformações experimentais têm mostrado que existe um limite de dilatância para rochas de sal que sofreram estiramento (Cristescu & Hunsche, 1993). Se as tensões mecânicas excederem um limite crítico de deformação em rochas de sal, esta será acompanhada por um início de dilatância, que é a abertura de microfissuras. Informações sobre o estado de microfraturamento em materiais rochosos podem ser obtidas pelas medições de propriedades elásticas (Popp & Kern, 1998). A medição das velocidades elásticas constitui uma importante ferramenta para monitorar o estado *in situ* de microfraturamento em rochas de sal, pois esta técnica é muito sensível à presença de descontinuidades (Popp & Kern, 2000).

Xu & King (1989) mostraram que o microfraturamento afeta a permeabilidade e a velocidade das ondas elásticas, provocando um aumento de permeabilidade e um decréscimo nas velocidades elásticas.

Popp & Kern (1998) observaram, em um perfil litológico de poço perfurado em sal, uma boa correlação entre altas permeabilidades e baixas velocidades. Entretanto, como não encontraram uma tendência sistemática da variação de permeabilidade com a profundidade, foi sugerido que a dilatância inicial observada não era controlada pela profundidade e sim pelo tipo litológico. Tamanhos de grãos de minerais de halita e a distribuição de impurezas (anidrita e polihalita) foram os fatores dominantes que afetaram as propriedades de dilatância da rocha de sal.

### 1.1. Ondas Primárias (P) e Ondas Secundárias (S)

As ondas longitudinais, compressionais, primárias, ou simplesmente ondas P, correspondem a perturbações que se propagam através de um material, acústico ou elástico, a partir da aplicação de um esforço em algum ponto desse material. As ondas P provocam vibrações nas partículas do meio, na mesma direção da propagação, ao longo da sua trajetória. Tais vibrações estão associadas a deformações longitudinais – esforços de compressão ou dilatacionais – que provocam alterações no volume do material onde ocorre a propagação. Portanto, as ondas P podem ocorrer tanto em fluidos (meios acústicos) como em sólidos (meios elásticos).

As ondas cisalhantes, transversais, secundárias, ou simplesmente ondas S, correspondem a perturbações (vibrações das partículas) que ocorrem transversalmente à direção de propagação. Tais perturbações estão associadas a esforços cisalhantes, os quais provocam mudanças na forma do material onde ocorre a propagação. Portanto, somente materiais elásticos permitem a propagação das ondas S, pois os meios acústicos (fluidos) não resistem a mudanças na sua forma.

### 1.2. Velocidades de Ondas Sísmicas

As equações do movimento para as ondas P e S que se propagam através de um material, podem ser definidas em termos de deformações dilatacionais e rotacionais (ver Richter, 1958). Isto é, as velocidades das ondas P e S ( $V_P$  e  $V_S$ , respectivamente) estão relacionadas com os módulos de elasticidade e a densidade do material. As relações são

$$V_P = \sqrt{\frac{k + 4m/3}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-n)E}{(1+n)(1-2n)\rho}}, \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{r}}} = \sqrt{\frac{E}{\mathbf{r}} \frac{1}{2(1+\mathbf{n})}}, \quad (2)$$

em que  $\rho$  é a densidade do material,  $\mathbf{m}$  é o módulo de cisalhamento,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $k$  é a incompressibilidade e  $\nu$  é a razão de Poisson.

A partir da equação (1) verifica-se que, para  $\mu = 0$  (como é o caso para meios líquidos e gasosos), a velocidade das ondas P é menor do que para o caso dos materiais sólidos ( $\mathbf{m} > 0$ ). Um aspecto importante desta relação é que as ondas P são significativamente mais lentas enquanto se propagam através de rochas porosas e altamente fraturadas. A velocidade das ondas S ( $V_s$ ) é, em primeiro lugar, função do módulo de cisalhamento ( $\mu$ ). Por isso, a partir da equação (2) verifica-se que  $V_s$  se torna igual a zero quando  $\mu = 0$ . Assim, as ondas S não podem se propagar através de meios líquidos e gasosos. Uma vez que as constantes elásticas são positivas, através da equação (1) e (2) verifica-se que  $V_p$  é sempre maior do que  $V_s$ .

Na prospecção sísmica, as ondas mais importantes são as P porque são as primeiras a serem registradas.

### 1.2.1. Fatores que afetam a velocidade

A velocidade sísmica é função da densidade e de propriedades elásticas das rochas. As equações (1) e (2) mostram que as velocidades das ondas P e S ( $V_p$  e  $V_s$ ) variam inversamente com a raiz quadrada da densidade ( $\rho$ ). Contudo, os geofísicos rapidamente verificaram, a partir de estudos de campo, que a velocidade sísmica é elevada para rochas densas. Isto acontece pelo fato dos módulos de elasticidade  $K$  e  $\mathbf{m}$  serem também dependentes de  $\rho$  e aumentarem mais rapidamente do que  $\rho$ . A razão  $V_p/V_s$  pode ser obtida usando as equações (1) e (2) e pode ser escrita como

$$\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 = \frac{2(1-\mathbf{n})}{(1-2\mathbf{n})}. \quad (3)$$

Esta relação permite determinar a razão de Poisson ( $\nu$ ) a partir do conhecimento de  $V_P/V_S$ .

### **1.3. Objetivo**

Estudar as velocidades de propagação de ondas elásticas (ondas P e S) em rochas evaporíticas. Para este fim, foram analisadas as velocidades elásticas dos tipos litológicos carnalita, halita, silvinita, e taquidrita oriundas da bacia Sergipe-Alagoas, cedidas gentilmente pela Companhia da Vale do Rio Doce e pela Petrobrás.

Foram realizados na primeira fase testes laboratoriais de velocidades de ondas P e S nas amostras de halita e silvinita em apenas uma direção de propagação para a obtenção dos seus valores. Posteriormente, foram realizadas tomografias ultrassônicas de propagação de velocidades de ondas P em amostras de testemunho de halita e carnalita com o objetivo de medir o campo interno de velocidades dos testemunhos, obtendo-se imagens da variação interna de velocidades elásticas. Além disso, para complementar os resultados foram realizados também tomografias de propagação de raios-x nas amostras de halita e carnalita. Para a taquidrita foi realizado um experimento para a obtenção da velocidade de onda P na câmara de pressão hidrostática.

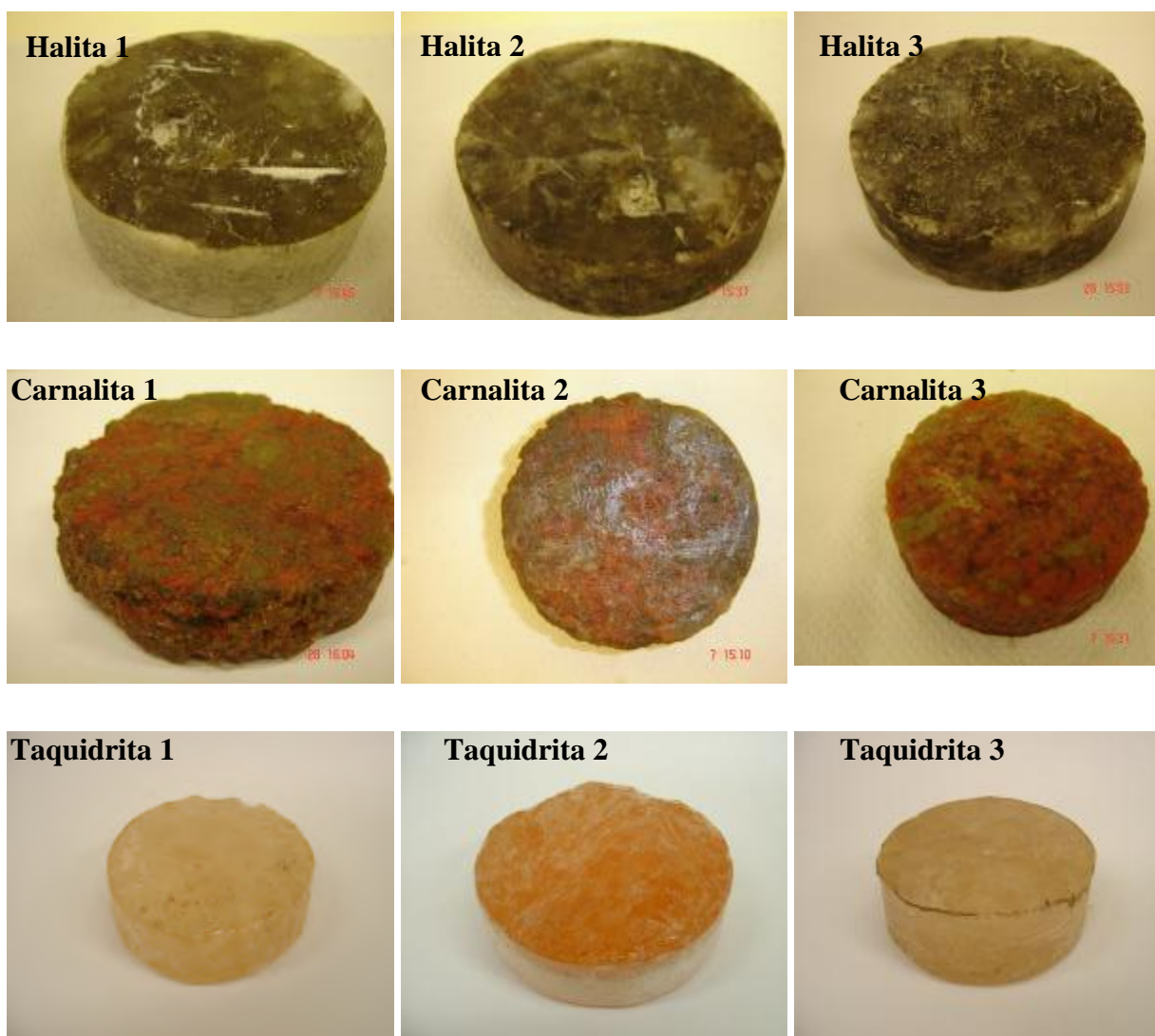
### **1.4. Materiais**

A Companhia Vale do Rio Doce cedeu oito amostras de evaporitos para a realização dos testes, sendo quatro de halita e quatro de silvinita. São testemunhos que possuem um diâmetro em torno de 3,8 cm conforme exemplificado abaixo (Figura 1.1). A Petrobrás forneceu nove amostras de evaporitos, sendo três de halita, três de carnalita e três de taquidrita com diâmetro em torno de 9 cm (Figura 1.2).



**Figura 1.1.** Testemunhos de evaporitos (halita e silvinita) com cerca de 3,8 cm de diâmetro provenientes da Bacia Sergipe-alagoas fornecidas pela Companhia Vale do Rio Doce. A halita tem uma textura bem fina enquanto que a silvinita é bastante granular.





**Figura 1.2.** Testemunhos de evaporitos (halita, carnalita e taquidrita) oriundos da Bacia Sergipe-Alagoas com diâmetro em torno de 9 cm. A halita apresenta-se com uma textura mais fina e mais compacta, a carnalita com uma textura mais granular e a taquidrita com uma textura bem fina e transparente.

## **2. ASPECTOS DA GEOLOGIA REGIONAL**

A Bacia de Sergipe–Alagoas está localizada no Nordeste brasileiro e compreende uma área de aproximadamente 36.000 km<sup>2</sup>, sendo um terço dessa área emersa e dois terços submersos (até a cota batimétrica de 2.000 m). Limita-se ao Sul com a Bacia de Jacuípe e ao Norte com a Bacia de Pernambuco-Paraíba (Schlumberger, 2006).

### **2.1. Tectônica e Sedimentação**

O arcabouço tectônico da bacia, gerado na fase sin-rifte, é bastante compartimentado: baixos estruturais, que formam verdadeiras sub-bacias com características evolutivas próprias, separadas por altos internos que alternaram períodos, como áreas de sedimentação, com outros que serviram como fonte de sedimentos.

As diversas etapas na evolução da separação das placas sul-americana e africana estão presentes no registro sedimentar da bacia (Figura 2.1 e 2.2):

a) a seção paleozóica, depositada em condições intracratônicas, é constituída por sedimentos glaciais/periglaciais da Fm. Batinga (Carbonífero) e sedimentos marinhos e continentais da Fm. Aracaré (Permiano);

b) a fase da depressão pré-rifte é representada por sedimentação continental em ambientes lacustre, fluvial e eólico, em condições bastante áridas, quando foram depositados os reservatórios mais contínuos da bacia: os arenitos fluviais/eólicos da Fm. Serraria (Jurássico/Eocretáceo), que se constituem em um dos principais alvos exploratórios, devido às suas ótimas características permoporosas, mesmo quando submetido a grandes soterramentos;

c) a seção, considerada como da fase sin-rifte pode ser subdividida em pelo menos quatro intervalos: Neocomiano/Barremiano, Eoaptiano, Neo-Aptiano e Albiano;

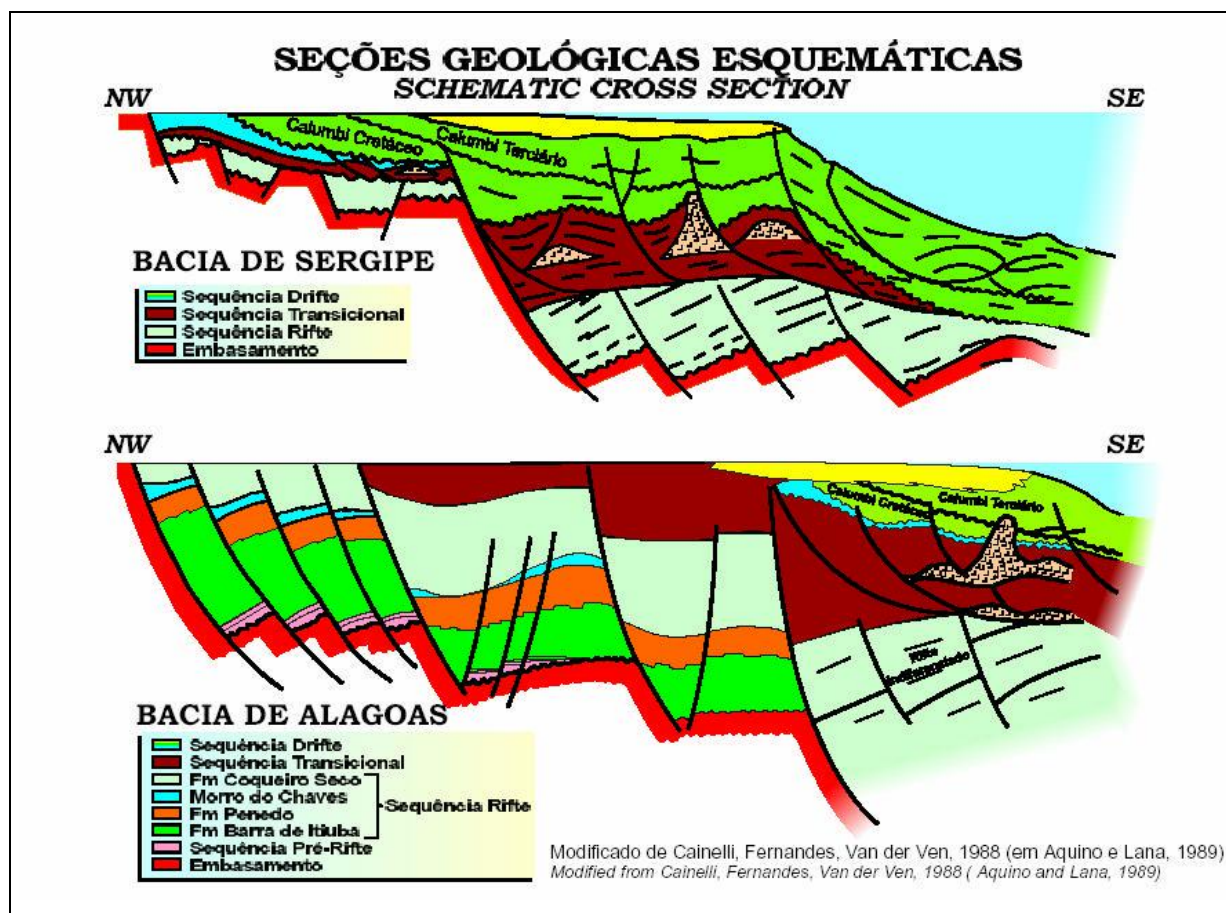
c1) a seção neocomiana/barremiana compreende principalmente as formações Barra de Itiúba (deposição lacustre/deltáica), Penedo (fluvial/eólica) e Rio Pitanga (cunha clástica de borda de bacia);

c2) a seção Eoaptiana é representada pela Fm. Coqueiro Seco (essencialmente lacustre, com altas taxas de sedimentação). Em altos estruturais desenvolveram-se bancos carbonáticos/coquinas do Mb. Morro do Chaves;

c3) apesar de haver indicações de ingressões marinhas desde o Eoaptiano, é no Neo-Aptiano que as mesmas se tornam progressivamente mais freqüentes. A seção neo-aptiana, na porção sergipana, inicia-se com a deposição de conglomerados e arenitos da Fm. Muribeca/Mb. Carmópolis, preenchendo paleovales de discordâncias regionais que se constituem nos principais reservatórios da bacia. O intervalo superior dessa seção corresponde aos folhelhos, calcilutitos e evaporitos dos membros Oiteirinhos e Ibura da Fm. Muribeca, principal seção geradora da bacia;

c4) o último intervalo, de idade albiana (Fm. Riachuelo), é composto por sedimentos marinhos, depositados em condições de bacia extremamente compartimentada, com grandes falhamentos, envolvendo o embasamento: uma cunha clástica de borda (Mb. Angico), áreas de deposição lagunar (Mb. Taquari), áreas de bancos carbonáticos de águas rasas, controlados por altos estruturais (Mb. Maruim) e as áreas de deposição marinha, mais abertas à frente dos bancos rasos (Mb. Taquari);

d) o intervalo pós-rifte possui uma seção carbonática (Fm. Cotinguiba, de idade cenomaniana/coniaciana), depositada em um contexto de bacia tipo rampa, que precede a espessa seção, depositada em condições de margem passiva de idade campaniana/recente: uma plataforma siliciclástica (Fm. Marituba), separada da deposição de talude/bacia (Fm. Calumbi) por uma seção de bancos carbonáticos (Fm. Mosqueiro). Turbiditos siliciclásticos da Fm. Calumbi, principalmente na porção marítima da bacia, tornaram-se os principais alvos exploratórios nos últimos anos. Esses turbiditos estão distribuídos em diferentes sistemas deposicionais: canal-dique marginal, como nos campos de Brejo Grande e Ilha Pequena, turbiditos confinados em sub-bacias de talude, produtores em Guaricema e Dourado, e leques de fundo de bacia.



**Figura 2.1.** Seção estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas (ANP, 2006)



### **2.1.1. Contexto Geológico da Formação de Depósitos Evaporíticos no Brasil, Especialmente na Bacia Sergipe-Alagoas**

No Brasil, depósitos evaporíticos Aptianos ocorrem nas bacias marginais formadas através dos vários processos relativos à ruptura do Gondwana e formação do Oceano Atlântico Sul. A fase evaporítica ocorreu quando da formação de um ambiente marinho restrito, denominado de golfo, que sucedeu a fase inicial de rifteamento, onde ambientes continentais prevaleciam, e antecedeu a fase marinha carbonática relativa a um mar raso que evoluiu para a bacia oceânica do Atlântico Sul. Tais depósitos evaporíticos formam um pacote espesso, de 1 km ou mais localmente, que caracteriza um importante marco estratigráfico observado em poços e seções sísmicas obtidos na margem continental.

Na Bacia de Sergipe, a seqüência evaporítica ocorre em parte na porção terrestre, em subsuperfície, e é formada principalmente por halita, silvinita, carnalita, além de anidrita, taquidrita e carbonatos do Membro Ibura da Formação Muribeca. Tais depósitos evaporíticos foram formados em uma série de ambientes costeiros representados por sabkhas, lagoas salinas e canais de maré (Szatmari et al., 1974; Oliver, 1997). A silvinita, carnalita e a taquidrita em menor proporção, vêm sendo exploradas a partir de minas e galerias subterrâneas para fins comerciais como fertilizantes, principalmente.

### 3. MODOS DE FORMAÇÃO DOS EVAPORITOS

Como mencionado anteriormente, os ambientes de formação dos evaporitos ocorrem tanto em situações de caráter continental como marinho. O ambiente marginal marinho é representado pelas planícies do tipo sabkha e salinas, porém os evaporitos podem ser formados em ambientes marinhos rasos e profundos; além desses, os lagos salinos em áreas continentais são extremamente importantes para a formação de camadas espessas de sais em seqüências lacustres (Silva et al., 2001).

A química da água do mar moderna é dominada pelos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , e quantidades menores de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ . Quando a água do mar é evaporada, uma suite de minerais é precipitada em ordem previsível. O primeiro mineral é um carbonato, comumente aragonita ou calcita, quando a solução alcança a concentração equivalente a duas vezes à da água do mar. A seguir ocorre a precipitação de sulfato, geralmente na forma de gipsita ou anidrita, quando a salmoura se encontra em uma concentração equivalente a cinco vezes àquela da água do mar. Em concentrações equivalentes a onze e doze vezes a halita se precipita. Após isto, sais complexos de potássio e magnésio (exemplo, carnalita), entre outros, podem precipitar em concentrações superiores a sessenta vezes à original. Os tipos de sais complexos e as respectivas salinidades da salmoura variam de acordo com a temperatura ou com os níveis de material orgânico presentes na salmoura.

Três fatores críticos controlam a formação dos minerais evaporíticos e seu acúmulo: a baixa umidade relativa do ar, a temperatura, o conteúdo iônico inicial e suas relações. Isto ocorre independente do caráter continental ou marinho do ambiente de formação.



### 3.1. Característica Físico-química dos Evaporitos (Carnalita, Halita, Silvinita e Taquidrita)

#### A) Carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) – Cloreto Hidratado de Magnésio e Potássio

*Dados cristalográficos:* ortorrômbico

*Hábito:* cristais são incomuns, pseudo-hexagonais. Normalmente, maciça ou granular.

*Propriedades físicas:*

*Clivagem:* não apresenta. Fratura conchoidal

*Dureza:* 2.5

*Densidade relativa:* 1.6 (baixa)

*Brilho:* graxoso

*Cor:* incolor a branco leitoso, amarelo, raramente azulado. Frequentemente vermelho, devido a inclusões orientadas de hematita. Transparente a translúcido.

Gosto amargo, altamente higroscópico, dissolve em ambientes úmidos (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Carnalita  
(foto: Joaquim Sanz / Museum of Geology Valentí Masachs – Carnalita, 2006)



## B) Halita (NaCl) – Cloreto de Sódio (sal comum ou sal gema)

*Dados cristalográficos:* isométrico

*Hábito:* cúbico, outras formas são raras. Alguns cristais possuem forma de tremonha (pirâmide oca invertida), que resulta da maior taxa de crescimento nos cantos e arestas no cristal, relativamente ao centro das faces. Ocorre também em massas granulares a compactas em raras variedades fibrosas.

*Propriedades físicas:*

*Dureza:* 2.5

*Densidade relativa:* 2.16 (baixa)

*Brilho:* vítreo, transparente e translúcido

*Cor:* incolor a branco. Impurezas podem resultar em tonalidades de amarelo, vermelho, rosa, azul e púrpura.

*Traço:* branco

Solúvel em água com extrema facilidade. Gosto salgado (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Cristal de halita  
(foto: Joaquim Sanz / Museum of Geology Valentí Masachs – Halita, 2006)

**C) Silvinita** - é a rocha que contém halita e silvita misturadas.

### **C.1) Silvita (KCl) – Cloreto de Potássio**

*Dados cristalográficos:* isométrico

*Hábito:* cristais cúbicos e octaédricos freqüentemente combinados. Freqüentemente em massa cristalinas granulares.

*Propriedades físicas:*

*Dureza:* 2

*Densidade relativa:* 1.99 (baixa)

*Brilho:* vítreo. Transparente a translúcido.

*Cor:* incolor a branco. Impurezas podem resultar em tons de azul, amarelo ou vermelho. A cor vermelha, decorrente de pequenas inclusões de hematita, é comum.

*Traço:* branco

Menos quebradiça que a halita, ao ser sulcada com o canivete produz menos pó (tendência do mineral em ser relativamente mais séctil). Gosto salgado, mais amargo do que a halita. A silvita é solúvel em água com muita facilidade.

Possui a mesma estrutura cristalina da halita (Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Silvinita (Cardona, Barcelona – Minerales, 2005)

**D) Taquidrita ( $\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12[\text{H}_2\text{O}]$ ) – Cloreto Hidratado de Cálcio e Magnésio**

*Dados cristalográficos:* trigonal

*Hábito:* ocorre formando grandes massas cristalinas.

*Propriedades físicas:*

*Dureza:* 2

*Densidade relativa:* 1.66 (baixa)

*Brilho:* vítreo. Transparente a translúcido.

*Cor:* amarelo a incolor.

*Traço:* branco

É um raro componente de depósitos evaporíticos marinhos. Altamente higroscópico, dissolve em contato com a umidade do ar (Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Taquidrita granular (Tachyhydrite, 2006)

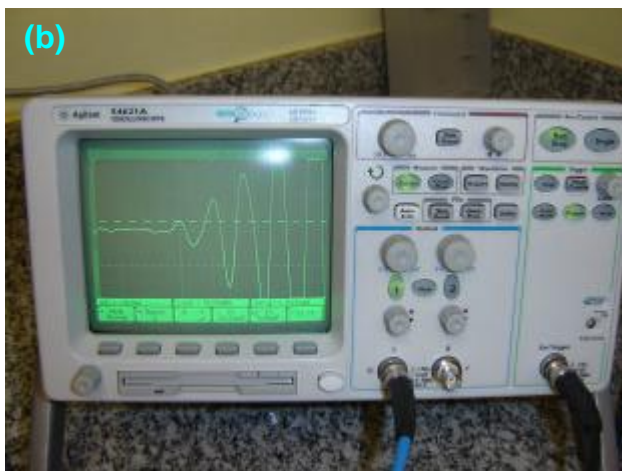
## 4. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES

### 4.1 Método Tradicional Unidirecional

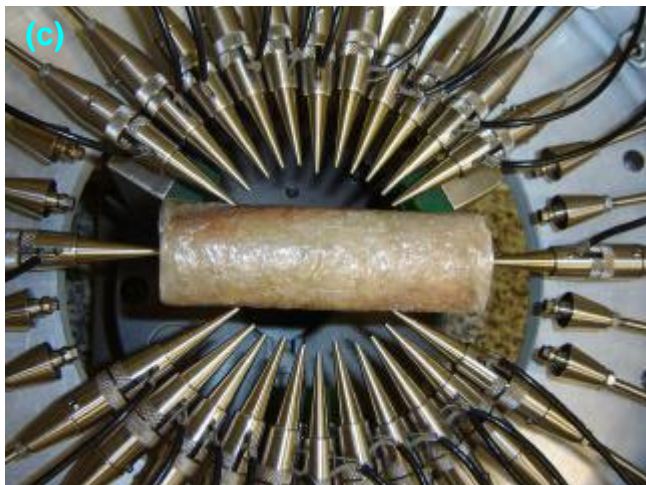
Primeiramente, foram realizados testes de velocidades no sentido unidirecional (Figura 4.1(c)), para a aquisição de valores de velocidades de ondas P e S nas amostras de halita, silvinita e taquidrita à pressão de 100 psi. Foi aplicado um pulso de 200 volts, gerado pelo *Pulse Receiver* (Figura 4.1(a)), e transmitido à amostra por um transdutor piezo-elétrico que transformou essas correntes elétricas em vibrações mecânicas. Assim que as ondas percorreram toda a amostra no sentido unidirecional, um outro transdutor em contato com ela agiu como receptor e transformou essas vibrações mecânicas em correntes elétricas. Esses sinais foram transmitidos para o osciloscópio para serem amplificados e medidos os primeiros tempos de chegada dessas ondas (Figura 4.1(b)).



**Figura 4.1(a).** *Pulse Receiver* – instrumento utilizado para a geração dos pulsos elétricos que serão enviados ao transdutor transmissor.



**Figura 4.1(b).** Osciloscópio – utilizado para fazer ampliações do sinal e facilitar a leitura dos tempos de primeira chegada das ondas.



**Figura 4.1(c).** Amostra de evaporito submetida ao teste de velocidade na direção de maior comprimento.

Não foi possível medir a velocidade das amostras de taquidrita seguindo este sistema e nem por meio do tomógrafo. Devido a uma relação sinal/ruído desfavorável, as formas de onda registradas nas amostras de taquidrita não permitiram uma leitura confiável dos tempos de primeira chegada das ondas. Isso acontece devido à maior atenuação do sinal nas amostras de taquidrita em relação aos demais evaporitos. Para aquisição de sua velocidade, foi realizado um único teste em câmara de pressão hidrostática sob a pressão de 500 psi, realizado no Laboratório de Física de Rochas do Centro de Pesquisas da Petrobras.

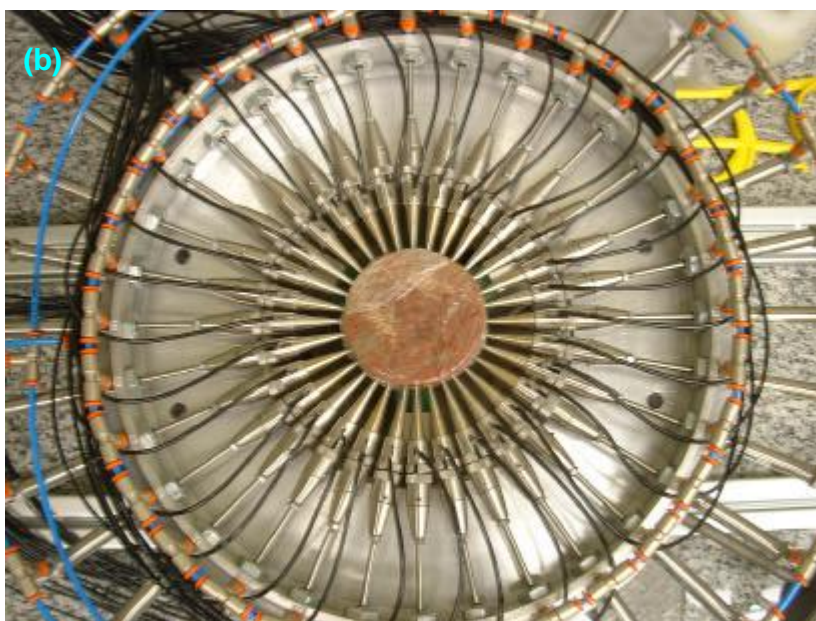


## 4.2 Tomografia Ultra-Sônica

Foram realizados testes de tomografia ultra-sônica de onda de P nas amostras de halita e carnalita fornecidas pela Petrobras, equipamento construído no Laboratório de Petrofísica do Departamento de Geologia da UFRJ. O sistema descrito acima para o método de medição de velocidade unidirecional se aplica também ao tomógrafo. O equipamento é composto por um grande anel de alumínio com 32 pistões regularmente distribuídos ao longo da circunferência do anel. Os pistões têm acionamento pneumático e, no seu interior, cada pistão contém um transdutor piezoelétrico que neste caso é o de onda P. A pressão aplicada foi cerca de 100 psi, a mesma para todos os pistões (Figura 4.2(a) e 4.2(b)).



**Figura 4.2(a).** Visão geral do tomógrafo situado no Laboratório de Petrofísica da UFRJ (Soares, 2006).



**Figura 4.2(b).** Amostra de evaporito submetida ao ensaio de tomografia ultra-sônica, contida na coroa de 32 pistões.



**Figura 4.2(c).** Visão mais detalhada da carnalita em contato com os 32 pistões do tomógrafo.

#### 4.2.1. Tomografia Ultra-sônica em Testemunhos

A tomografia é um método amplamente usado para registrar imagens internas de objetos fechados, entre os quais podemos incluir a Terra. No caso do imageamento da subsuperfície terrestre, a principal técnica utilizada, para alvos relativamente profundos, é o imageamento sísmico, o qual pode ser de superfície ou entre poços. No caso da sísmica interpoços, são usados algoritmos de inversão matemática a fim de se obter imagens que mostram a variação das velocidades elásticas (no plano vertical definido pelos poços), os chamados tomogramas.

A principal informação registrada em um levantamento sísmico de tomografia interpoços é o conjunto de tempos de trânsito da onda entre os diversos pares fonte-receptor. Para transformar essa informação (tempo) em velocidade, é preciso conhecer a distância percorrida por cada raio. Como estamos interessados em conhecer as velocidades dentro de cada célula da malha de discretização, precisamos então conhecer os comprimentos dos segmentos dos raios dentro de cada uma das células. A matriz cujos elementos são os comprimentos desses segmentos de raio é chamada de matriz jacobiana e ela é obtida pela superposição do traçamento de raios com a malha de discretização. Como a velocidade, por definição, é dada pela razão entre o espaço e o tempo, podemos escrever

$$\left[ \frac{1}{V} \right] = \frac{[t]}{[x]} \quad (1)$$

onde  $[t]$  é o vetor dos tempos de trânsito registrados,  $[x]$  é a matriz jacobiana, e  $\left[ \frac{1}{V} \right]$  é o vetor de vagarosidades. A vagarosidade é uma grandeza dada pelo inverso da velocidade. Desses três elementos, conhecemos o vetor dos tempos e a matriz jacobiana, o vetor de vagarosidades é o resultado da inversão. Portanto, para encontrar o vetor de vagarosidades, ou o seu inverso, o vetor de velocidades, é preciso antes encontrar a matriz inversa da jacobiana e multiplicá-la pelo vetor dos tempos de trânsito registrados. Daí, o termo inversão de dados. É corrente usar o termo inversão de dados referindo-se à construção de um modelo físico a partir da análise de um conjunto de dados. Esta forma genérica de se referir ao processo de inversão não está errada, mas a sua definição, a rigor, é um processo puramente matemático (Soares, 2005).

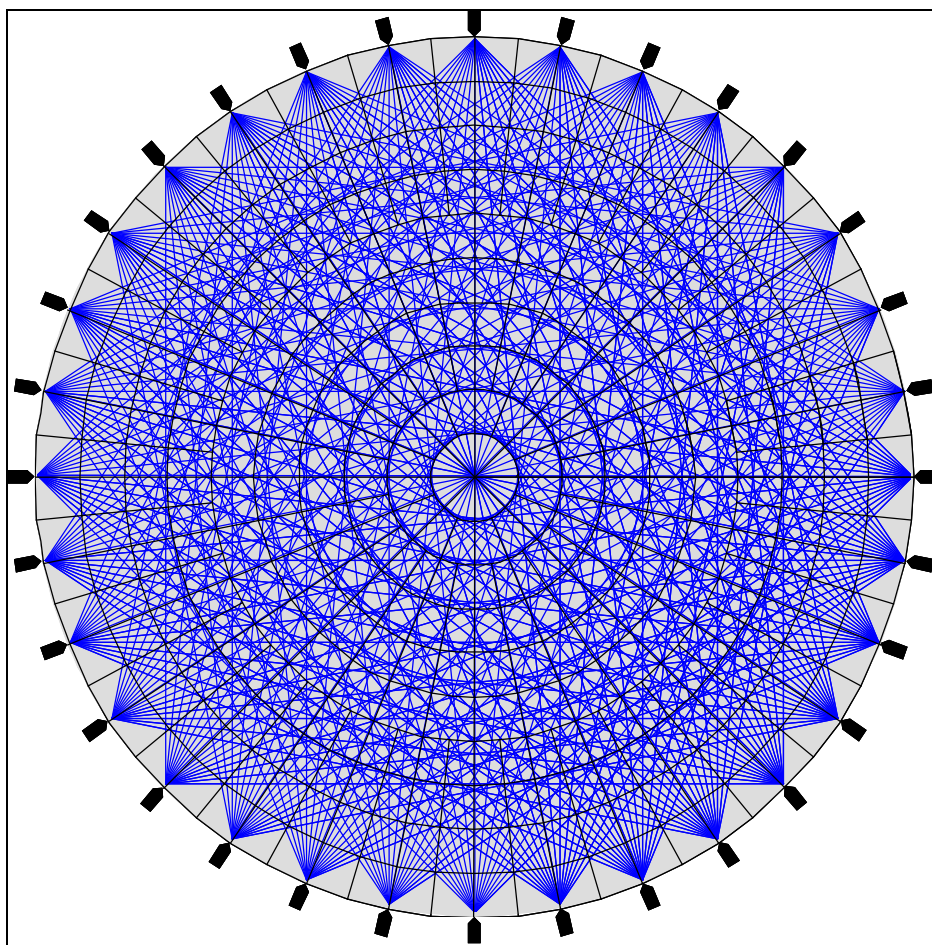


Os dados trabalhados em um processo de inversão são organizados em um sistema de equações da seguinte forma:

$$\begin{array}{c} \text{Número do raio} \downarrow \end{array} \begin{array}{c} \xrightarrow{\text{Número da célula}} \\ \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \end{array} \cdot \begin{bmatrix} 1/v_1 \\ 1/v_2 \\ \vdots \\ 1/v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde o primeiro elemento é a matriz jacobiana e os dois outros são os vetores de vagarosidade e de tempo. O número  $m$  de elementos do vetor dos tempos é igual ao número de pares fonte-receptor ativos do sistema de aquisição (ou o número de raios), o vetor das vagarosidades, por sua vez, tem o mesmo tamanho  $n$  do número de células da malha de discretização, enquanto que a matriz jacobiana tem a dimensão do número de raios pelo número de células ( $m \times n$ ).

Soares *et al.* (2004) apresentaram os resultados de um estudo no qual se demonstrou, através de diversas simulações, que é possível imagear heterogeneidades internas de um testemunho através do método de tomografia ultra-sônica. Essas heterogeneidades são representadas por zonas com velocidades maiores ou menores que a velocidade média. Demonstrou-se ainda que, usando um arranjo composto por trinta e dois transdutores ultra-sônicos em volta do testemunho, ainda que fosse adotada a simplificação do raio reto, o modelo inicial podia ser relativamente bem recuperado, desde que os contrastes de velocidades não fossem excessivamente elevados. Foi adotada por ele uma malha de discretização com o arranjo de 32 eletrodos. Este esquema de aquisição resultou em 544 raios e 408 células de discretização (Figura 4.2.1).



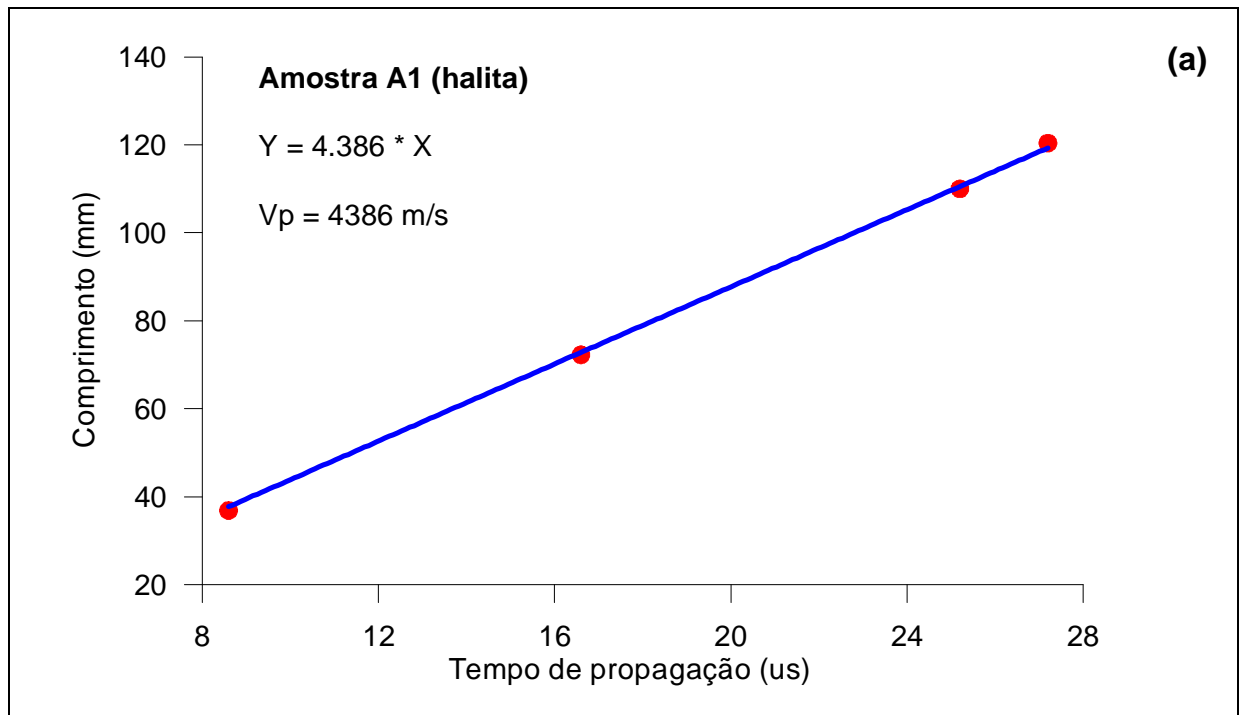
**Figura 4.2.1.** Esquema de disposição dos 32 eletrodos em volta do testemunho, com os respectivos 544 raios e as 408 células da malha de discretização (Soares, 2005).

## 5. RESULTADOS

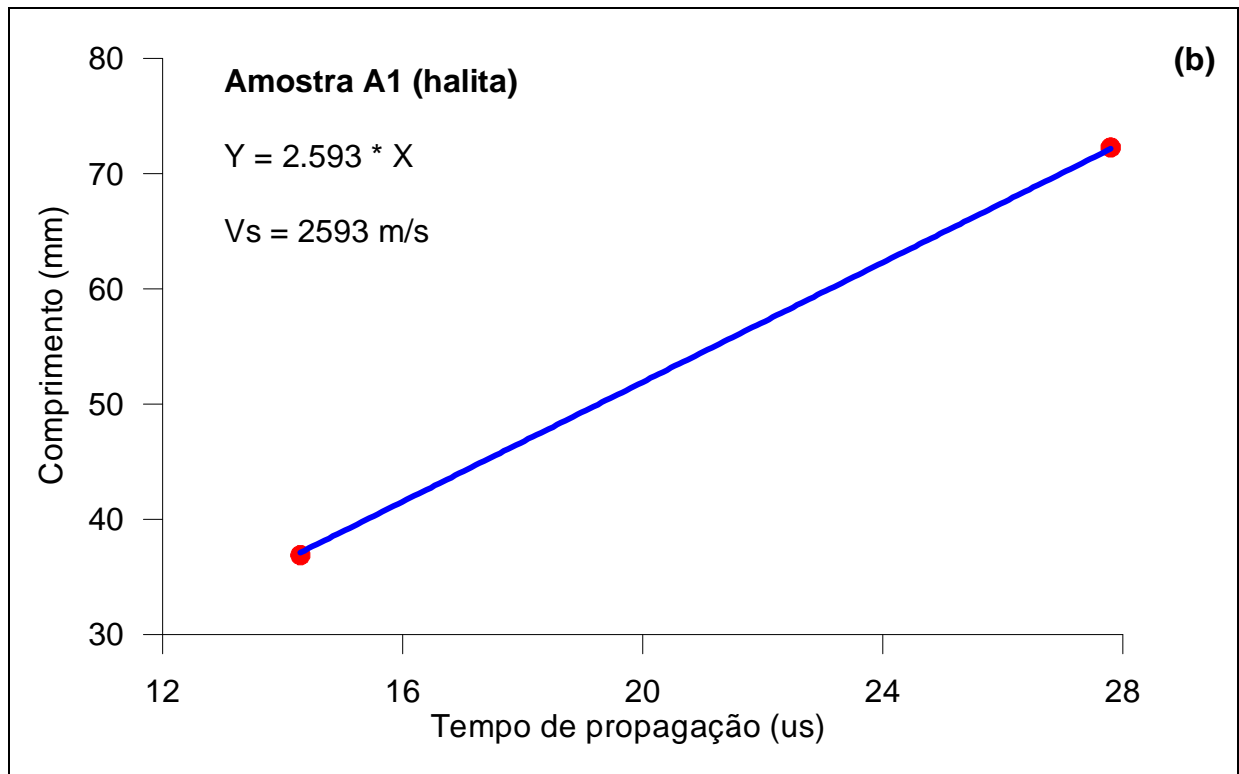
### 5.1 Velocidades Medidas no Sistema Unidirecional

O primeiro passo foi a aquisição das velocidades em duas amostras de halita (A1 e A2) e duas de silvinita (A3 e A4), gentilmente cedidas pela Companhia Vale do Rio Doce. Para a obtenção dos valores de velocidades de onda P ( $V_P$ ), foram feitas medições em quatro comprimentos diferentes das amostras A1, A2, A3 e A4. Para esse fim, cada amostra teve a  $V_P$  medida com a amostra em seu tamanho original (com extremidades irregulares e com extremidades aparadas), e em seguida a amostra foi serrada em dois pedaços menores (um com aproximadamente o dobro do comprimento do outro) os quais também foram submetidos à medição de velocidade. Para valores de velocidade de onda S ( $V_S$ ), foram feitas medições somente em dois tamanhos diferentes.

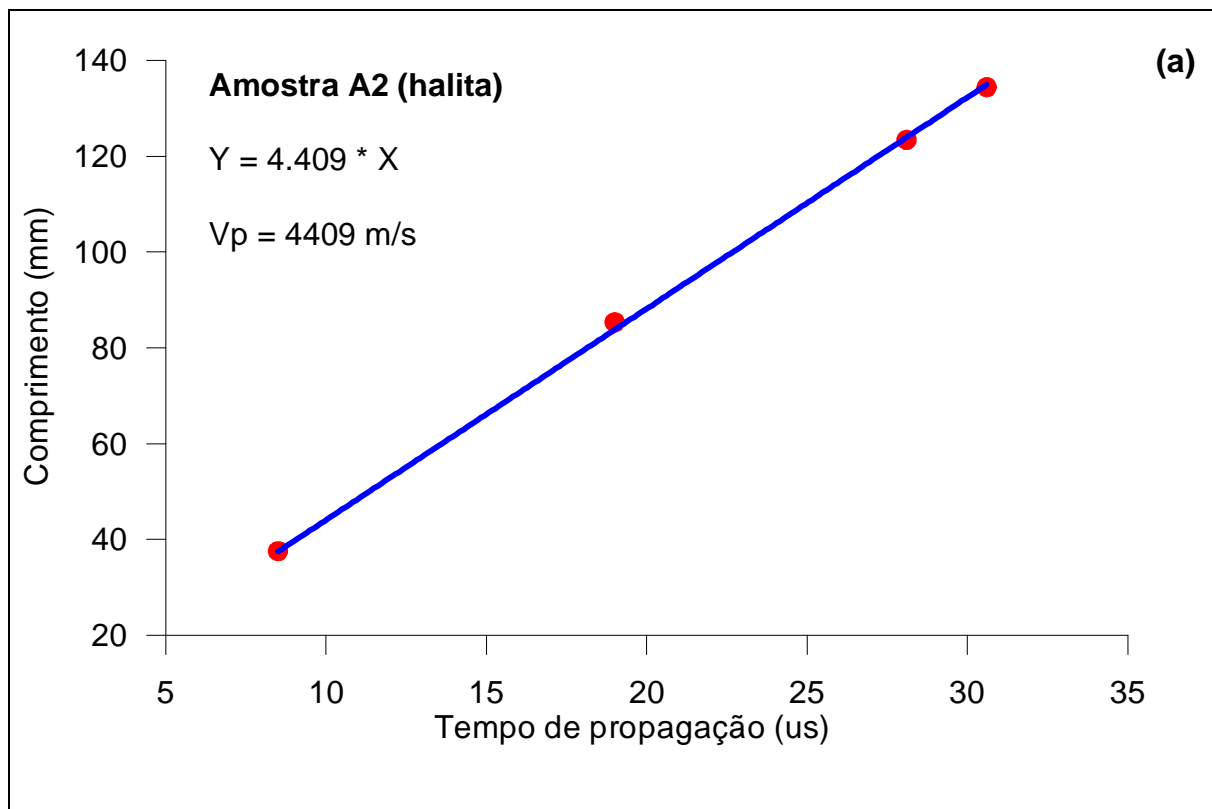
Conforme analisado nos gráficos abaixo, a amostra de halita A1 apresentou valores de  $V_P = 4386$  m/s e  $V_S = 2593$  m/s (Figura 5.1.1(a) e (b)), e a amostra de halita A2, valores de  $V_P = 4409$  m/s e  $V_S = 2774$  m/s (Figura 5.1.2(a) e (b)). A variação das velocidades de onda P e S entre os dois tipos de halita não foi tão significativa.



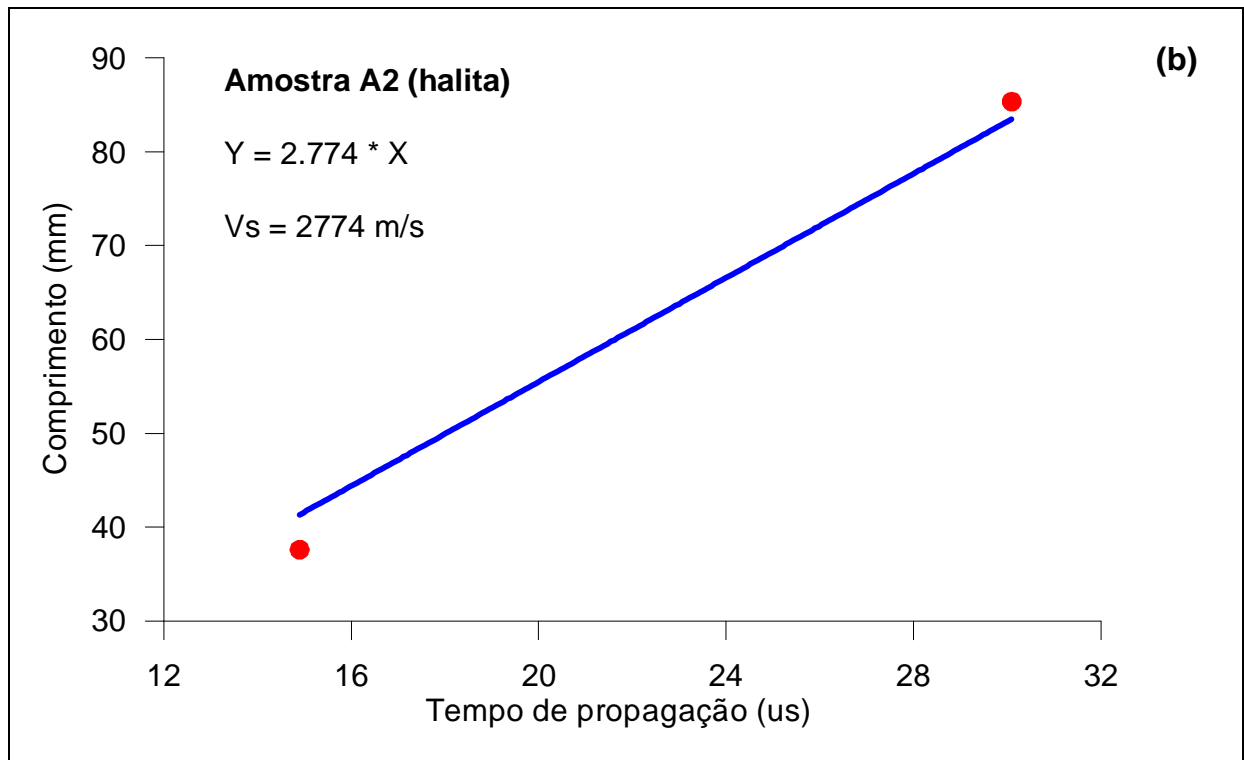
**Figura 5.1.1(a).** De acordo com o gráfico acima, a amostra de halita (A1) apresentou velocidade de onda P igual a 4386 m/s. Esse valor foi gerado a partir da relação entre o comprimento (mm) e tempo de propagação ( $\mu s$ ) das amostras. Para a obtenção de  $V_p$  foram medidas amostras de quatro tamanhos diferentes.



**Figura 5.1.1(b).** Conforme o gráfico, a amostra de halita (A1) apresentou velocidade de onda S igual a 2593 m/s. Para a obtenção de  $V_s$  foram medidas amostras de dois tamanhos diferentes. A relação entre a variação do comprimento (mm) e o tempo de propagação da onda ( $\mu\text{s}$ ) das amostras, gerou a reta da qual se calculou a velocidade.

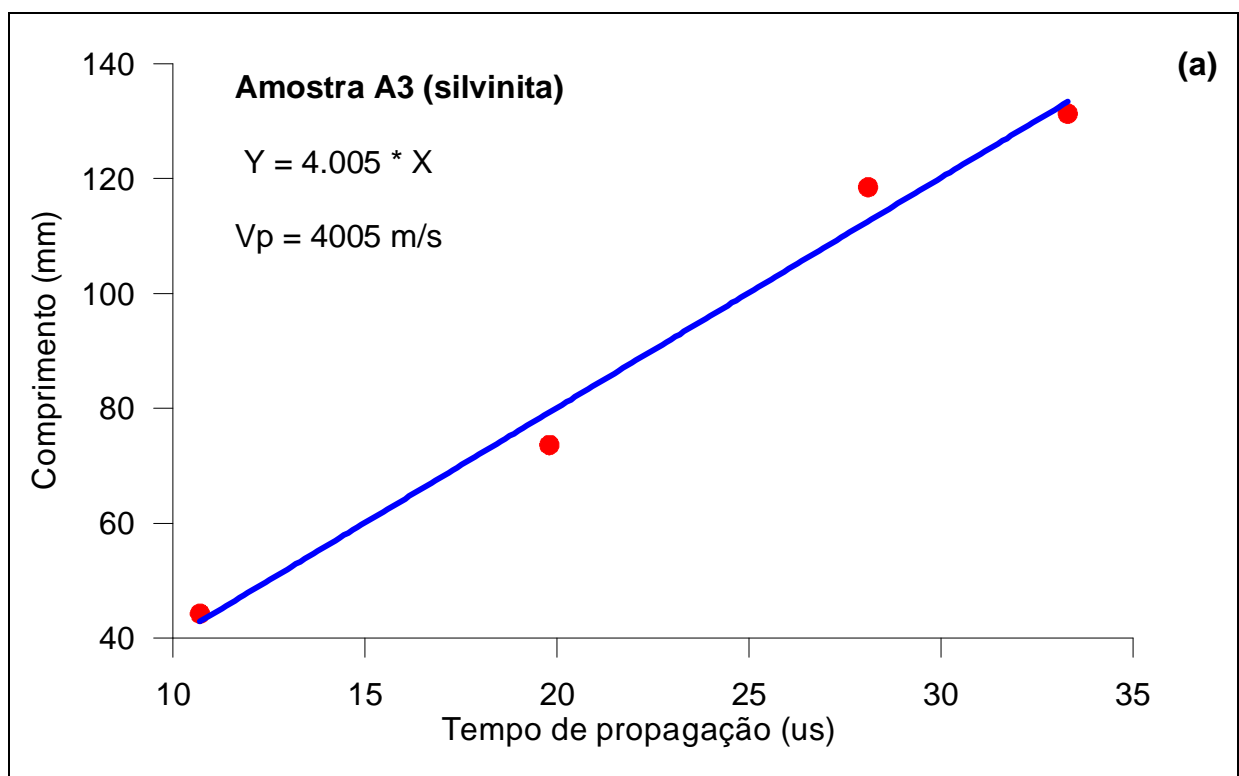


**Figura 5.1.2(a).** Mediante o gráfico, a amostra de halita A2 apresenta velocidade de onda P igual a 4409 m/s.



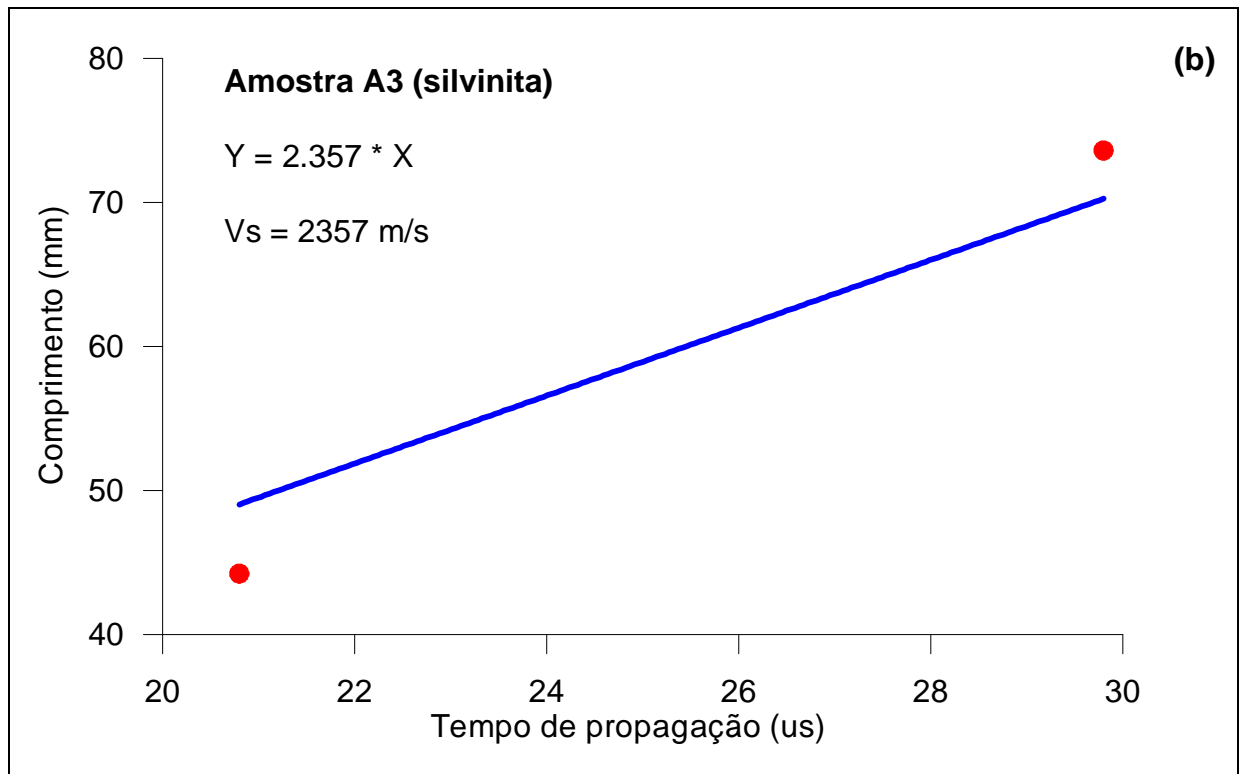
**Figura 5.1.2(b).** Com base na relação entre comprimento e tempo de propagação da amostra, a halita A2 apresentou velocidade de onda S igual a 2774 m/s.

Baseado nas análises dos gráficos abaixo, a amostra de silvinita A3 apresentou valores de  $V_P = 4005 \text{ m/s}$  e  $V_S = 2357 \text{ m/s}$  (Figura 5.1.3(a) e (b)), e a amostra de silvinita A4, valores de  $V_P = 3484 \text{ m/s}$  e  $V_S = 2183 \text{ m/s}$  (Figura 5.1.4(a) e (b)). A variação de velocidade de onda P nos dois tipos de amostras de silvinita é significativa. Deve-se lembrar, portanto, que a silvinita é uma rocha que contém a mistura de halita e silvita. A presença diferenciada desses componentes nas amostras pode, possivelmente, influenciar o resultado.

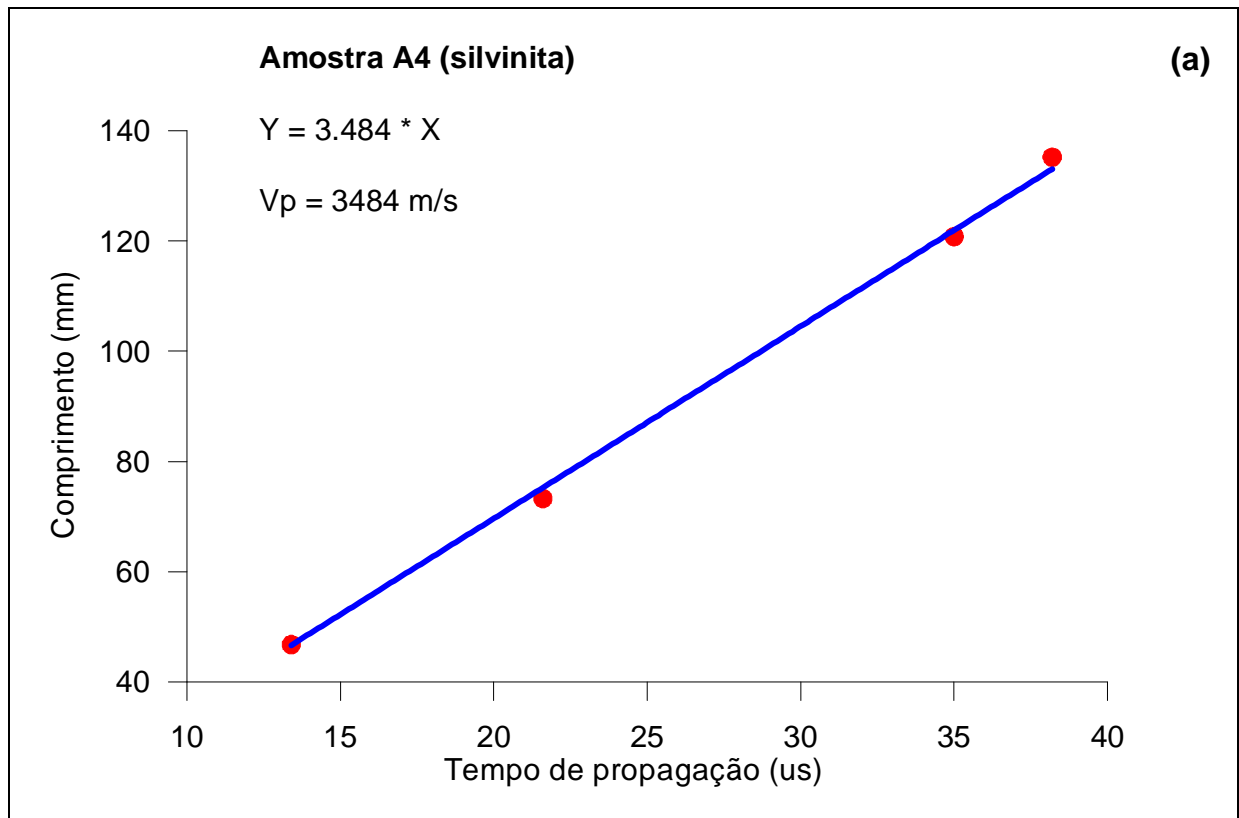


**Figura 5.1.3(a).** Mediante o gráfico, nota-se que a amostra de silvinita A3 tem velocidade de onda P igual a 4005 m/s.

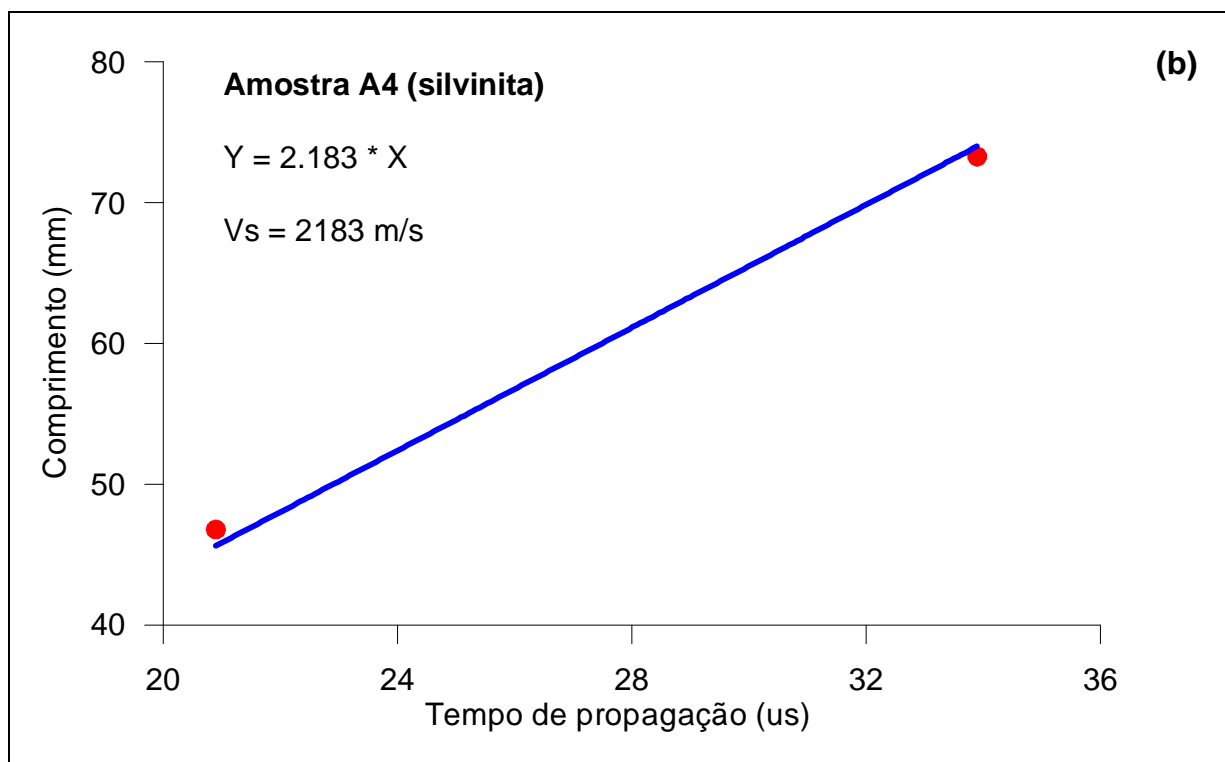




**Figura 5.1.3 (b).** O gráfico acima revela que a amostra de silvinita A3 apresenta velocidade de onda S igual a 2357 m/s.



**Figura 5.1.4(a).** Como evidenciado no gráfico, a amostra de silvinita A4 apresentou velocidade de onda P igual a 3484 m/s.



**Figura 5.1.4(b).** A amostra de silvinita A4 apresenta velocidade de onda S igual a 2183 m/s.

No primeiro grupo de testemunhos, as amostras de halita (A1 e A2) e de silvinita (A3 e A4) apresentaram as velocidades de ondas P e S, além dos valores para razão de Poisson, mostrados na Tabela 5.1. Como se pode ver da Tabela 5.1, as amostras de halita e silvinita não apresentaram, para este conjunto de amostras, valores de razão de Poisson que permitissem a sua identificação apenas com base nesse parâmetro.

**Tabela 5.1.** Valores de VP, VS e razão de Poisson ( $\nu$ ) nas amostras de halita (A1 e A2) e silvinita (A3 e A4).

Amostra	VP (m/s)	VS (m/s)	$\nu$
A1	4386	2593	0,23
A2	4409	2774	0,17
A3	4005	2357	0,24
A4	3484	2183	0,18

No segundo grupo de testemunhos (duas halitas (A5 e A6) e duas silvinitas (A7 e A8)) foram realizadas medições em apenas um comprimento (Tabela 5.1). A amostra de halita A5 apresentou valores de  $V_P = 4316$  m/s,  $V_S = 2573$  m/s e  $\nu = 0,22$  e a amostra de halita A6 valores de  $V_P = 4401$  m/s,  $V_S = 2564$  m/s e  $\nu = 0,24$ . A amostra de silvinita A7 apresentou valores de  $V_P = 3853$  m/s,  $V_S = 2609$  m/s e  $\nu = 0,08$  e a amostra de silvinita A8, valores de  $V_P = 3688$  m/s,  $V_S = 2529$  m/s e  $\nu = 0,06$ . Neste caso, as amostras de silvinita apresentaram valores de razão de Poisson consistentemente inferiores aos apresentados pelas amostras de halita. Acredita-se que o diferente comportamento, em termos da razão de Poisson, entre as amostras de silvinita do primeiro e segundo grupos de testemunhos, é uma decorrência da variação composicional dessas amostras, sendo provavelmente, as amostras de silvinita do primeiro grupo mais ricas em halita, e do segundo grupo, mais ricas em silvita.

**Tabela 5.2.** Valores de  $V_P$  e  $V_S$  nas amostras de halita (A5 e A6) e silvinita (A7 e A8) e os valores da razão de Poisson ( $\nu$ ).

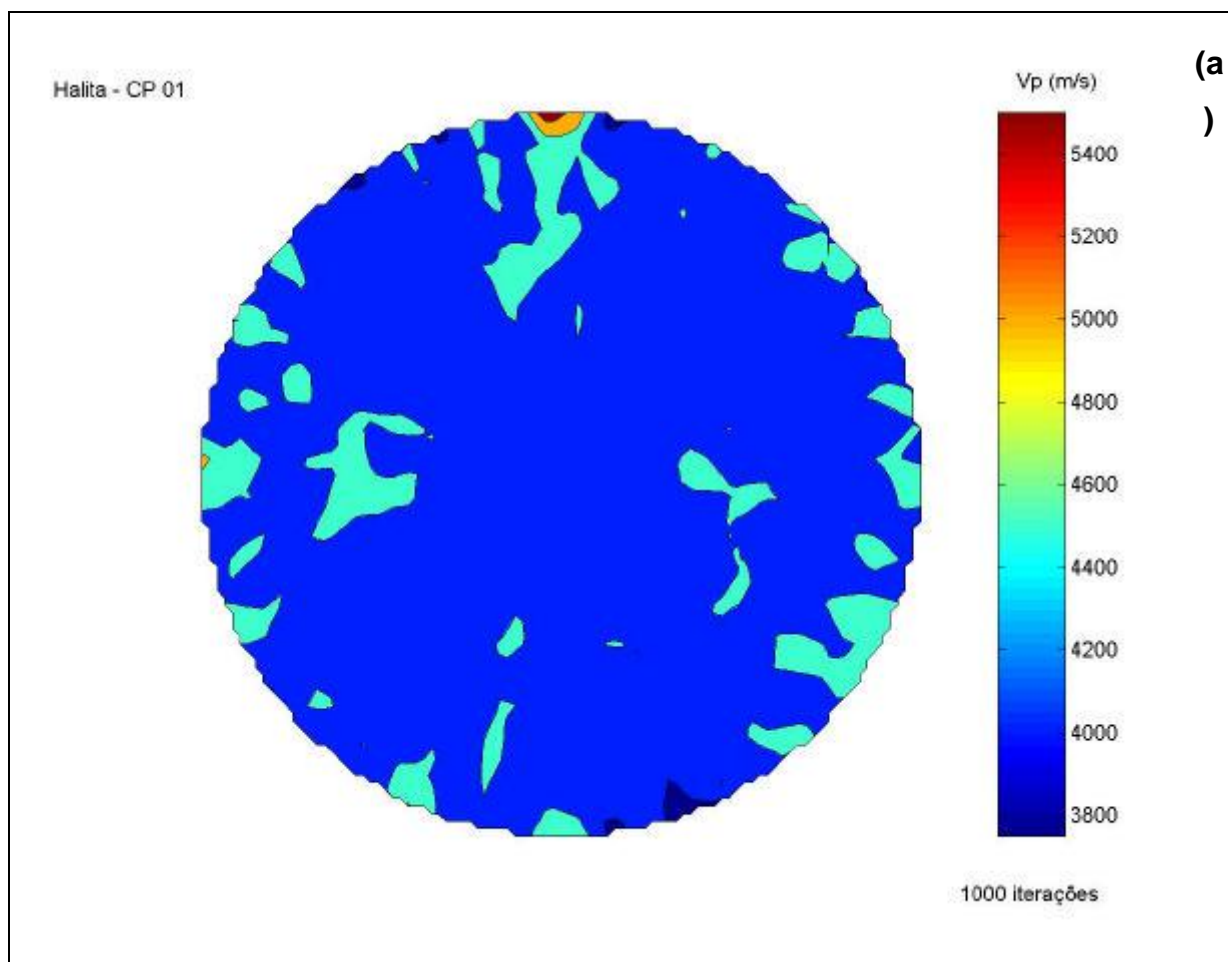
Amostra	Litologia	Comprimento $V_P$ (mm)	$V_P$ (m/s)	Comprimento $V_S$ (mm)	$V_S$ (m/s)	$\nu$
A5	halita	124,3	4316	124,8	2573	0,22
A6	halita	125,0	4401	125,1	2564	0,24
A7	silvinita	131,0	3853	132,3	2609	0,08
A8	silvinita	125,4	3688	122,9	2529	0,06

Nenhuma das amostras de taquidrita apresentou bons resultados com esse teste. Uma única amostra foi submetida ao teste de velocidade de onda P na câmara de pressão hidrostática que se localiza no Cenpes e apresentou velocidade igual a 3200 m/s a pressão de 500 psi.

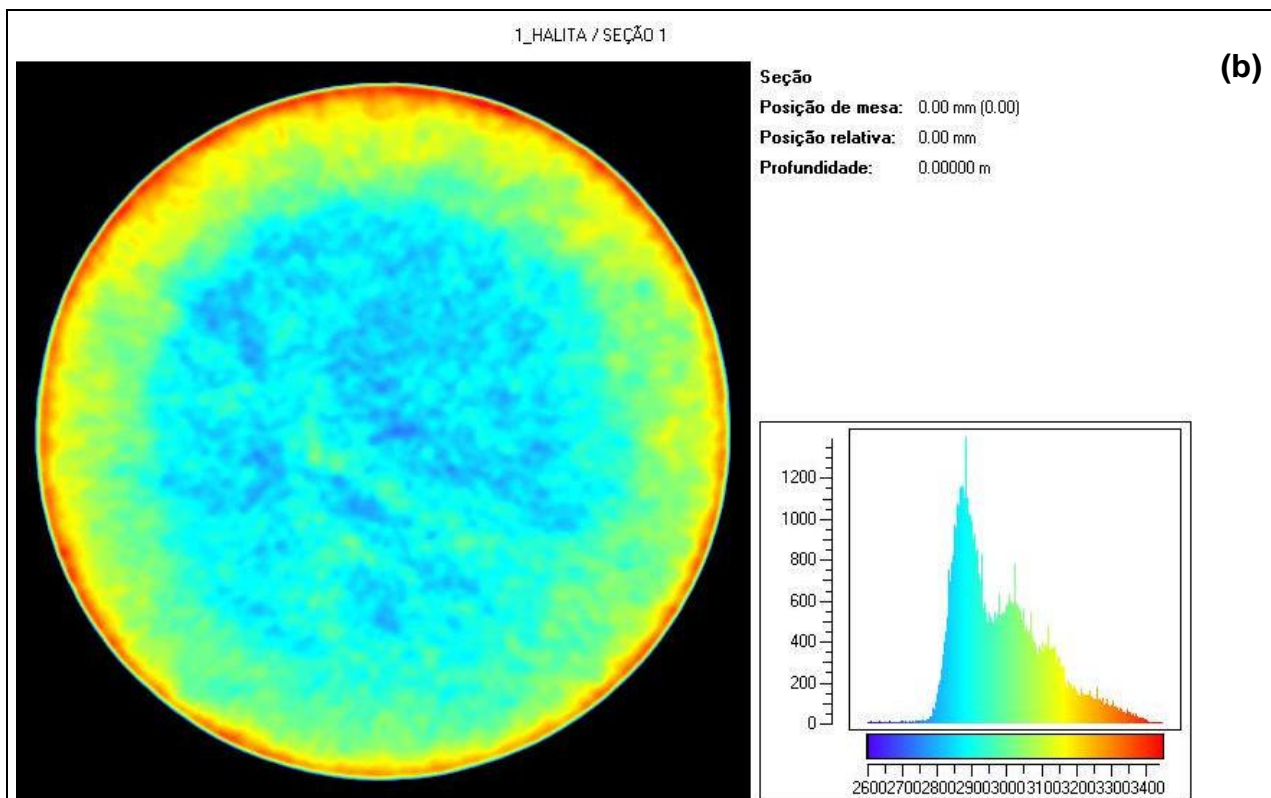
## 5.2 Tomograma

Foram obtidos tomogramas de velocidades de ondas P de três testemunhos de halita e de três testemunhos de carnalita. Como mencionado anteriormente, as três amostras de taquidrita não forneceram sinais que pudessem ser identificados e medidos com o sistema de tomografia ultra-sônica. A fim de comparar os tomogramas ultra-sônicos com uma imagem tomográfica tradicional, estes testemunhos de halita e carnalita, gentilmente cedidos pela Petrobras, foram também submetidos à tomografia de raios-x, cujos ensaios foram realizados no Centro de Pesquisas da Petrobras.

De acordo com a imagem observada na Figura 5.2.1(a) e 5.2.1(b), a amostra halita (1) é uma rocha relativamente homogênea apresentando valores de velocidade de onda P que variam em torno de 4000 m/s a 4400 m/s, sendo que, a velocidade predominante está em torno de 4000 m/s. Tanto o tomograma ultra-sônico quanto o tomograma de raios-x da amostra halita (1) mostraram que este testemunho é relativamente homogêneo e que ambas as técnicas tomográficas estão sujeitas a apresentar tomogramas com efeitos de borda (zonas de concentração de altas velocidades e altas densidades).

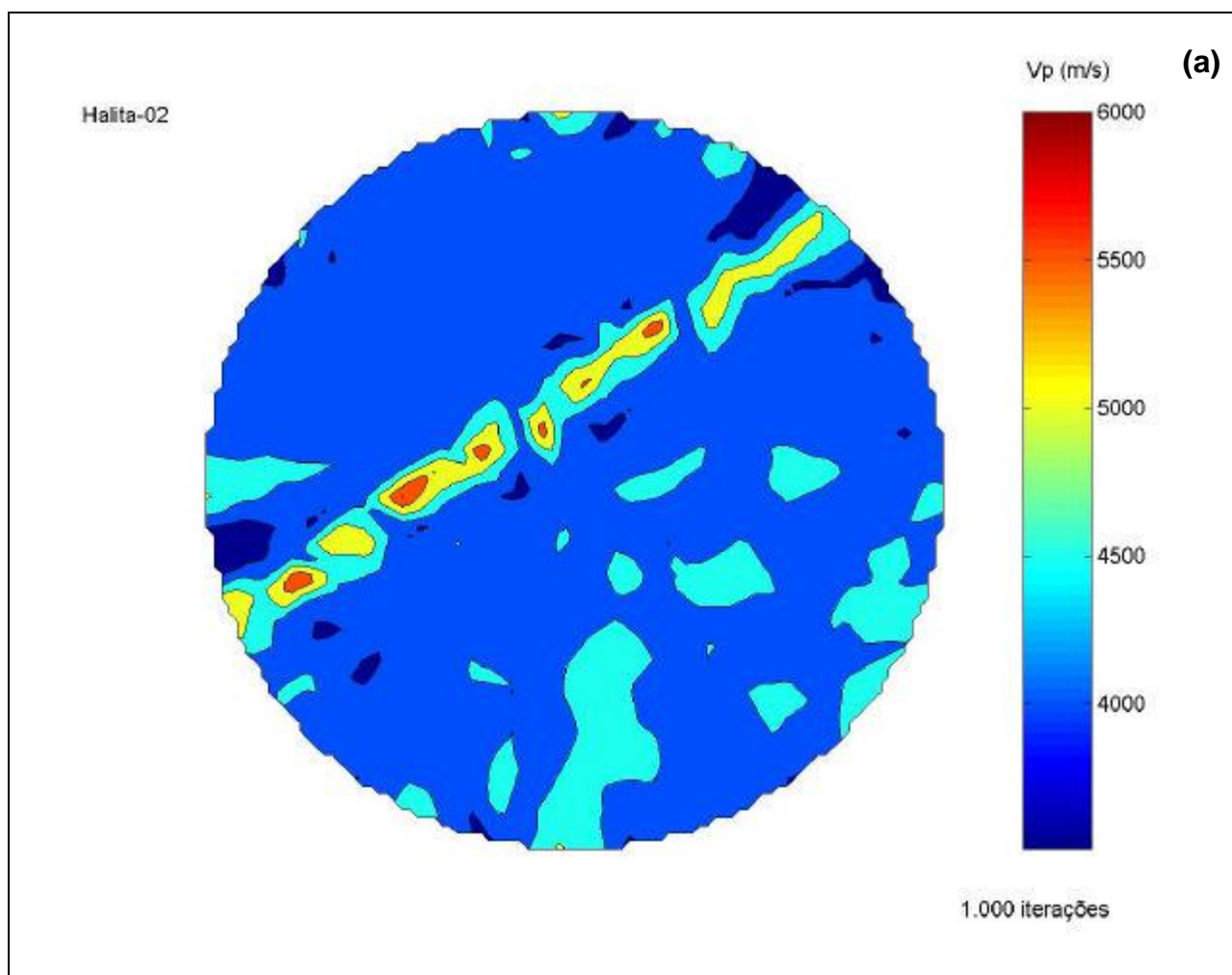


**Figura 5.2.1(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica de onda P da amostra halita 1, mostrando velocidade em torno de 4000 m/s.



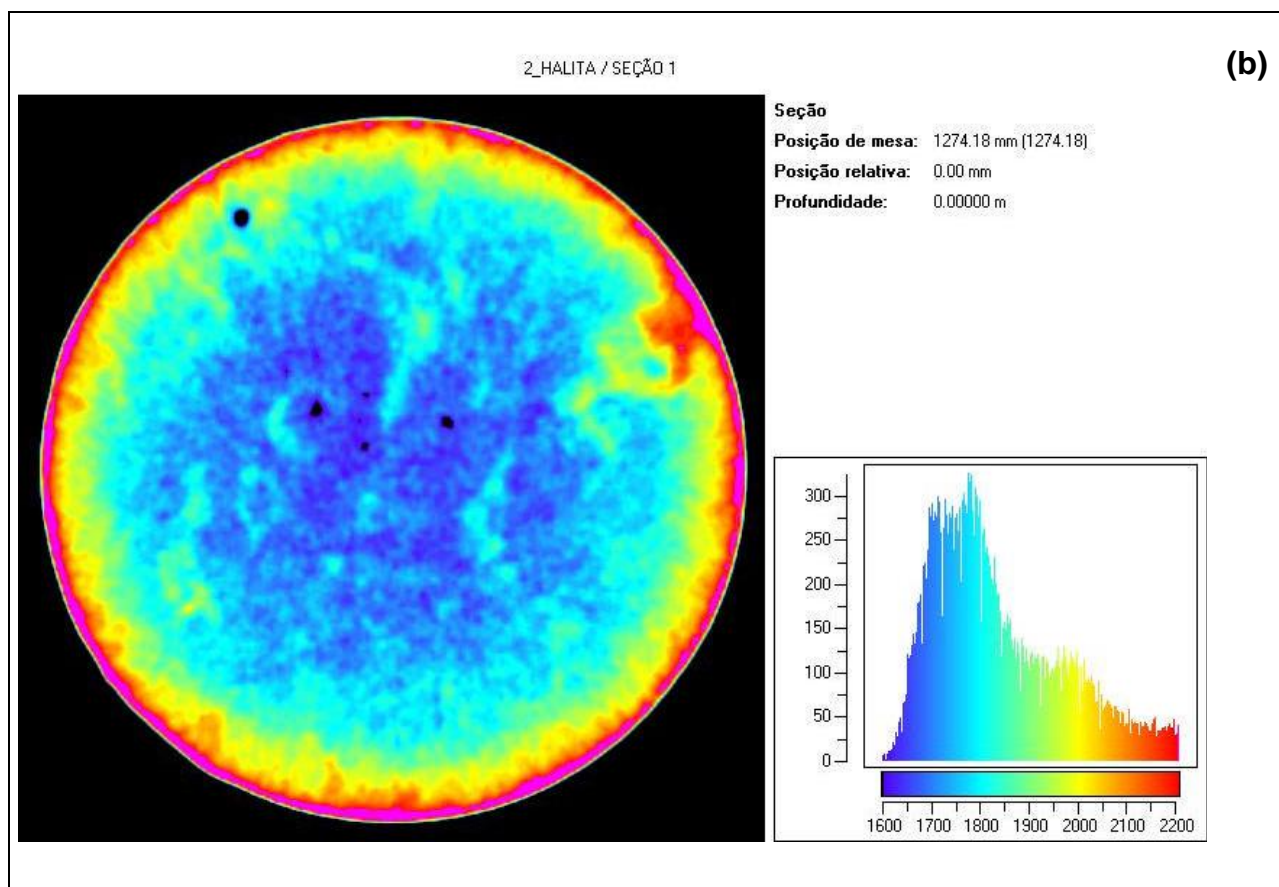
**Figura 5.2.1 (b).** Imagem de tomografia de raios-x para a amostra halita 1. Testemunho relativamente homogêneo, com efeitos de borda evidentes (Soares, 2006).

Segundo a Figura 5.2.2(a), a amostra de halita (2) apresentou regiões com velocidades que variam de 4000 m/s a 4500 m/s, sendo que, a velocidade predominante está em torno de 4000 m/s. Foi identificada uma zona linear, com direção NE/SW, de velocidade alta, em torno de 5200 m/s. Este evento linear foi interpretado como uma zona pré-existente de fratura preenchida por um material de velocidade mais elevada que a da halita do seu entorno. Provavelmente este evento revela uma linha de sutura de uma fratura pré-existente. A Figura 5.2.2(b) mostra um tomograma de raios-x também relativamente homogêneo, cuja imagem não detectou o evento linear observado no correspondente tomograma elástico. Por outro lado, o tomograma de raios-x identificou a presença de pequenos espaços vazios (da ordem de milímetros de diâmetro) os quais não foram identificados no correspondente tomograma ultra-sônico. Estes fatos mostram que a tomografia de raios-x tem maior resolução que a tomografia elástica e que a tomografia ultra-sônica consegue imagear de forma mais adequada a presença de descontinuidades no material, em comparação com a tomografia de raios-x.



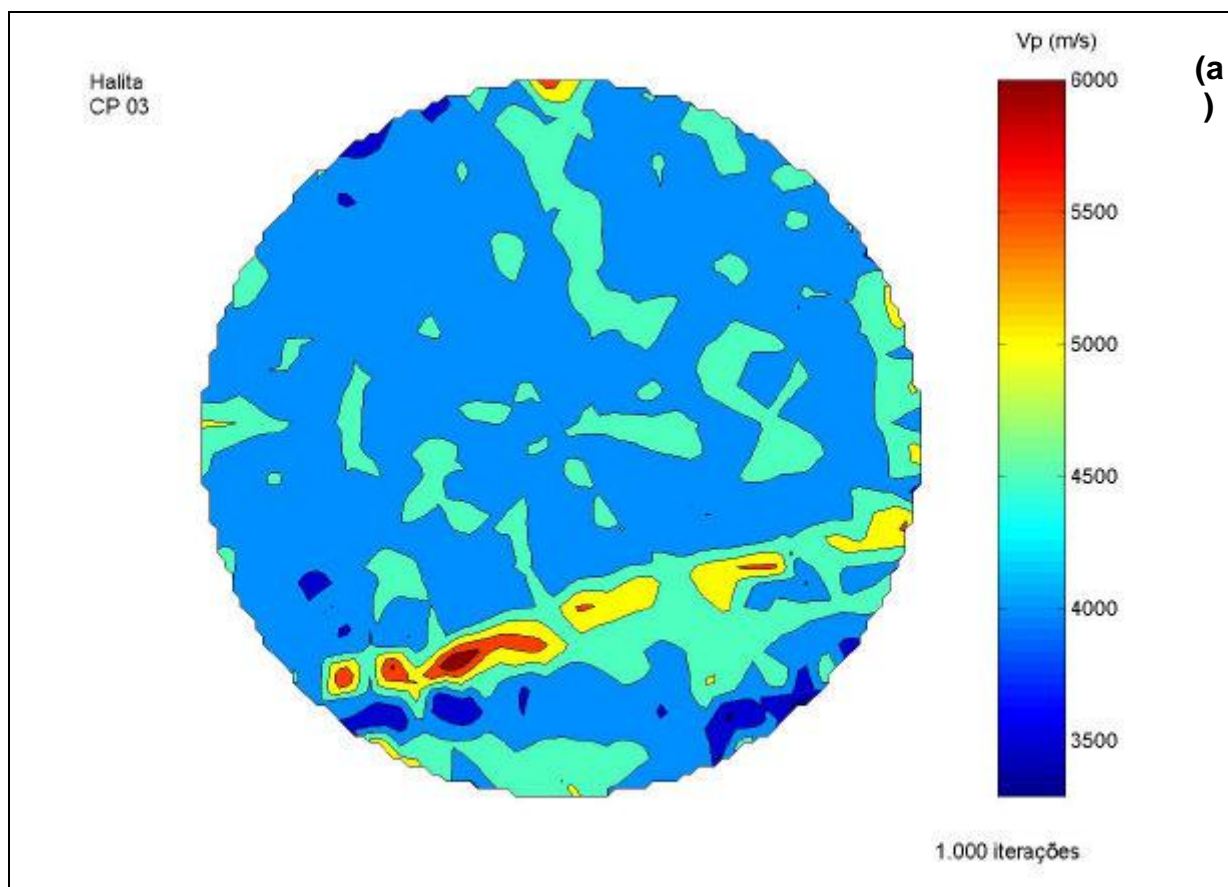
**Figura 5.2.2(a).** A imagem de tomografia ultra-sônica de onda P da halita 2 apresentou velocidade predominante para a rocha em torno de 4000 m/s. Observou-se um evento linear de alta velocidade na direção NE/SW, o qual foi interpretado como uma linha de sutura de uma fratura pré-existente.



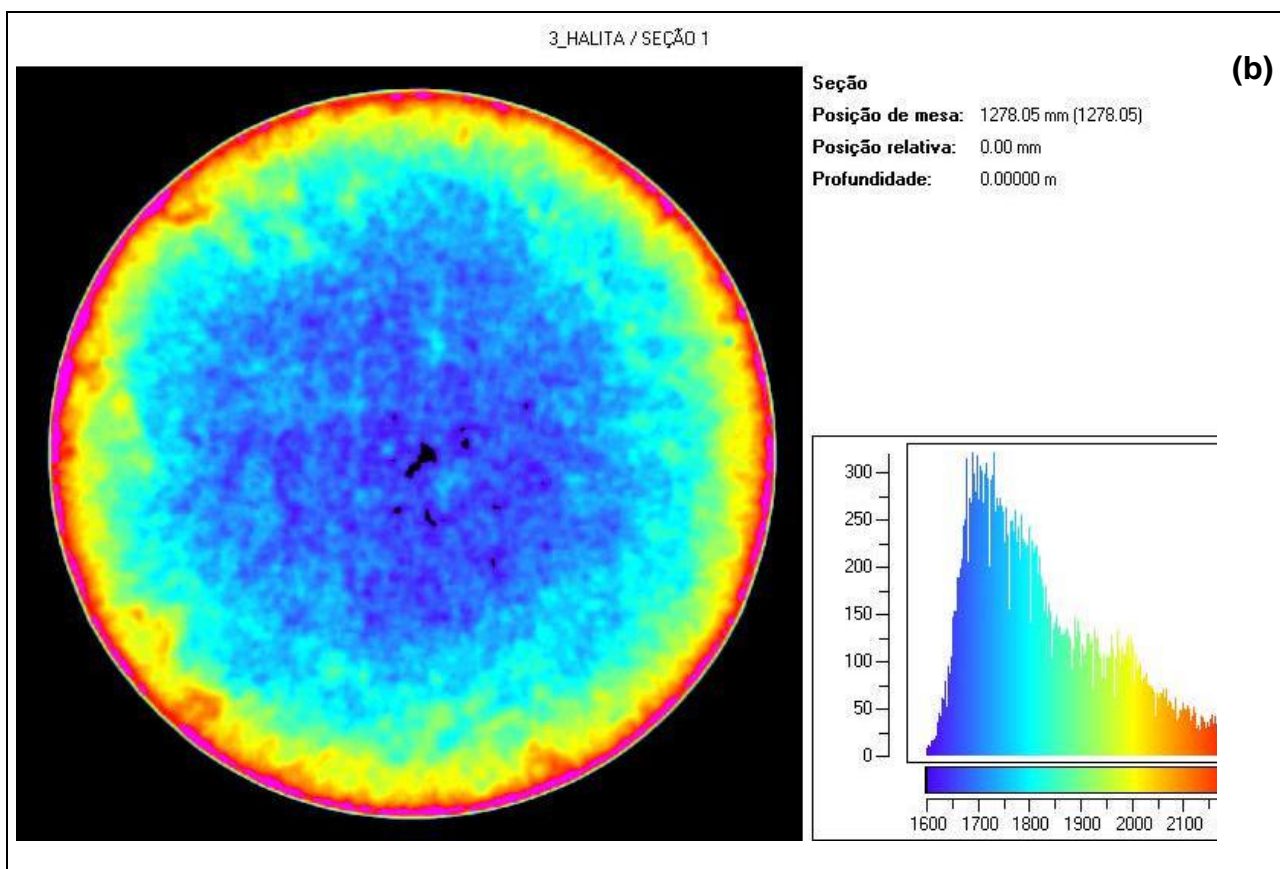


**Figura 5.2.2(b).** Imagem de tomografia de raios-x da amostra halita 2 . O tomograma apresentou alta resolução, identificando vazios milimétricos, mas sem identificar qualquer descontinuidade no material (Soares, 2006).

A análise dos tomogramas ultra-sônico e de raios-x da amostra halita (3) (Figuras 5.2.3(a) e 5.2.3(b)) apresentou velocidades que variam de 4000 m/s a 4500 m/s na seção, porém, a velocidade predominante está em torno de 4200 m/s. Foi identificado também na imagem, um evento linear que apresenta velocidades que variam de 5000 m/s a 5500 m/s. A tomografia de raios-x também não mostrou essa heterogeneidade, embora exiba uma alta resolução, evidente na identificação de pequenas zonas de espaços vazios no interior da amostra.



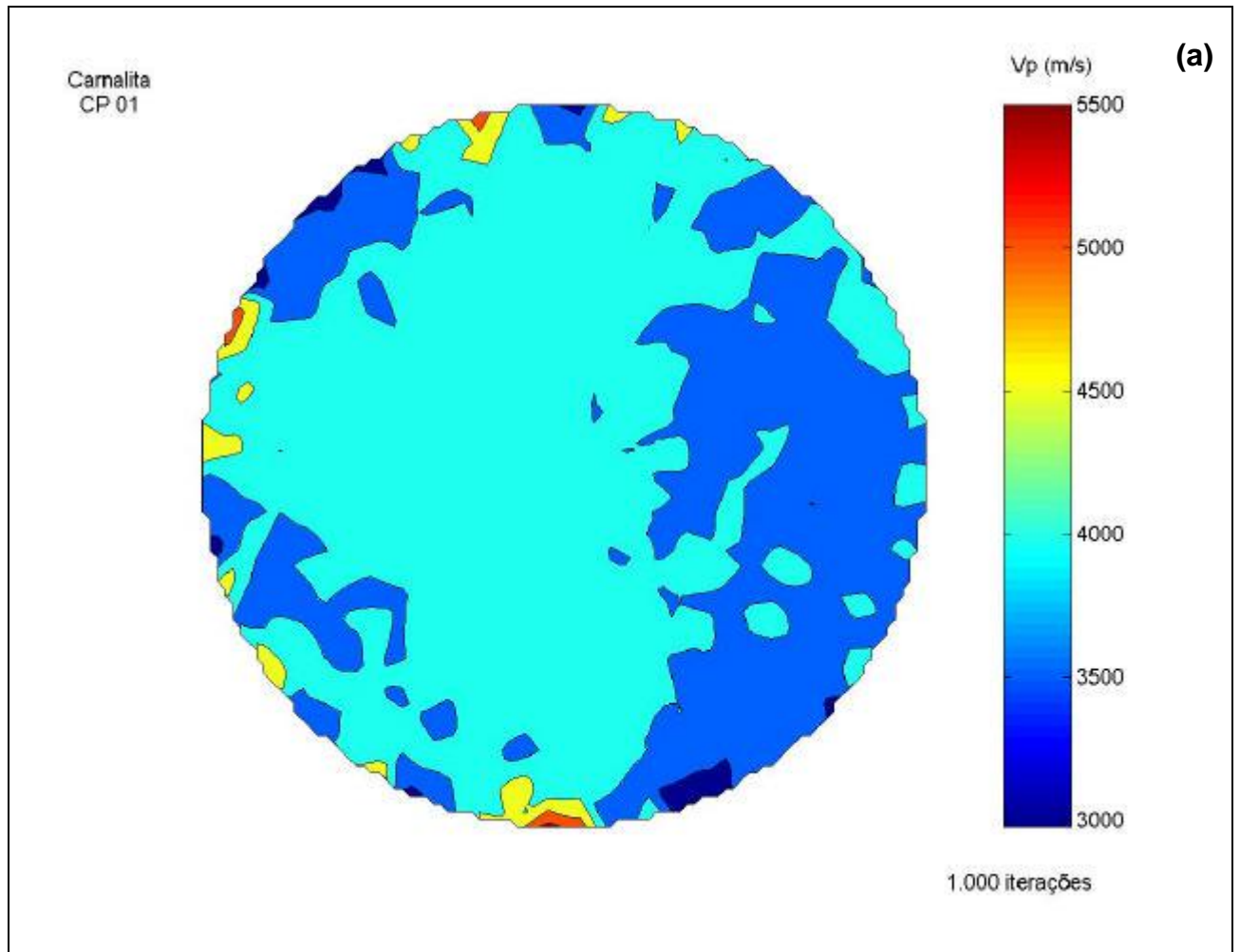
**Figura 5.2.3(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica da amostra de halita 3 apresentando velocidade de onda P predominante em torno de 4200 m/s. Também foi identificado um evento linear de alta velocidade.



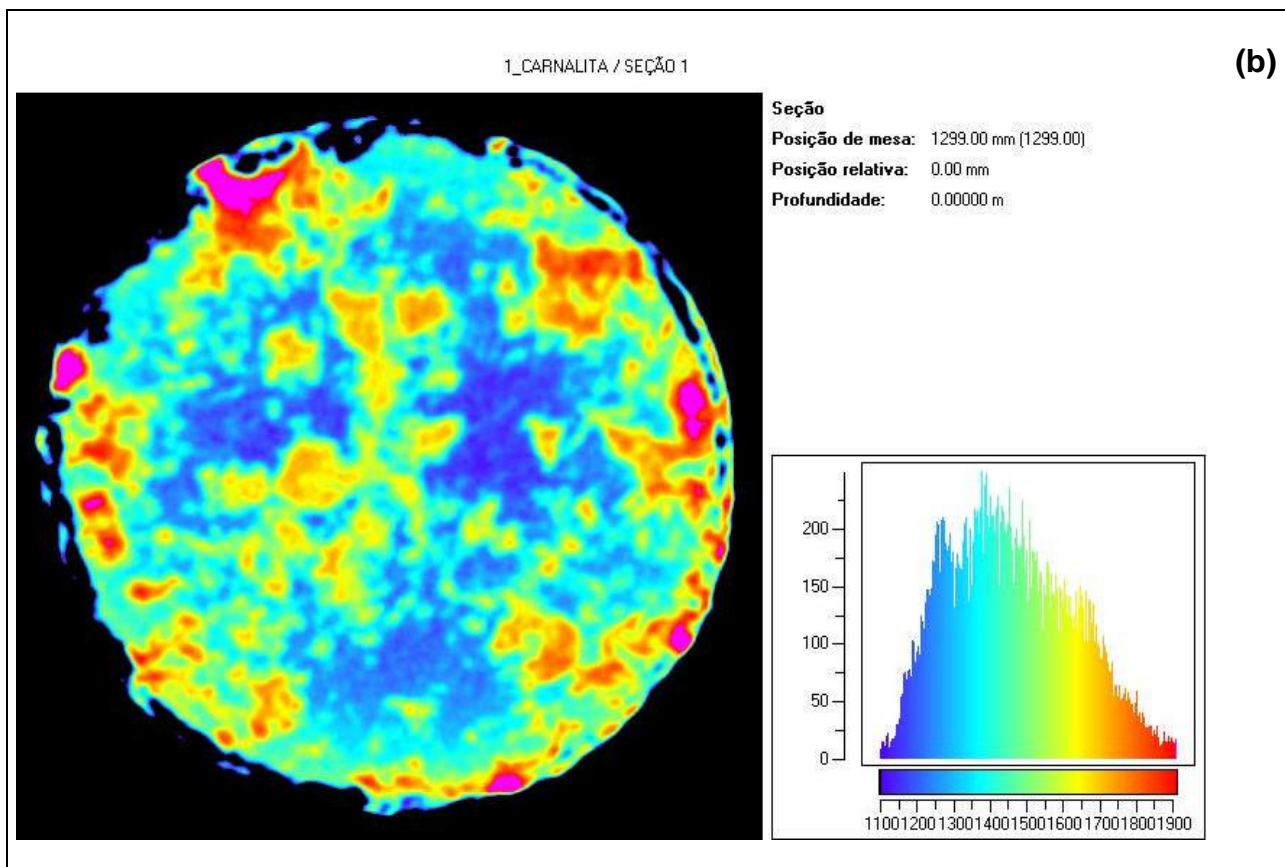
**Figura 5.2.3(b).** Tomografia de raios-x sem evidência de heterogeneidade para a amostra de halita 3, embora identifique a presença de pequenos espaços vazios no interior do testemunho (Soares, 2006).

Mediante a imagem adquirida para a amostra carnalita (1) de tomografia ultrassônica, percebe-se que a rocha é homogênea, não apresenta descontinuidades. No entanto, duas zonas são bem evidentes: uma apresenta velocidades de onda P em torno de 3500 m/s e a outra velocidade cerca de 4000 m/s. Provavelmente essa variação de velocidades retrata uma composição misturada entre halita (velocidades mais elevadas) e carnalita (velocidades mais baixas), o que é corroborado pela variação de cores apresentada pela amostra (Figura 1.2). Nas bordas do tomograma percebe-se zonas de alta velocidade ( $\approx 4700$  m/s) e de baixa velocidade ( $\approx 3000$  m/s) (Figura 5.2.4(a)). Possivelmente estes valores extremos de velocidade nas bordas do tomograma são resultado da menor iluminação dos raios nessa região, o que faz com que os erros de inversão migrem prioritariamente para essas regiões (Soares, 2006). A imagem fornecida pela tomografia de raios-x mostrou que os valores de densidade variam bastante, corroborando a idéia de que há uma grande heterogeneidade composicional nesta amostra. Provavelmente as zonas de

densidade mais elevadas possuem teores também elevados de halita, enquanto as zonas de densidade mais baixas correspondem às regiões de maior incidência de carnalita pura. Não foi identificada nenhuma descontinuidade neste tomograma. (Figura 5.2.4.(b)).



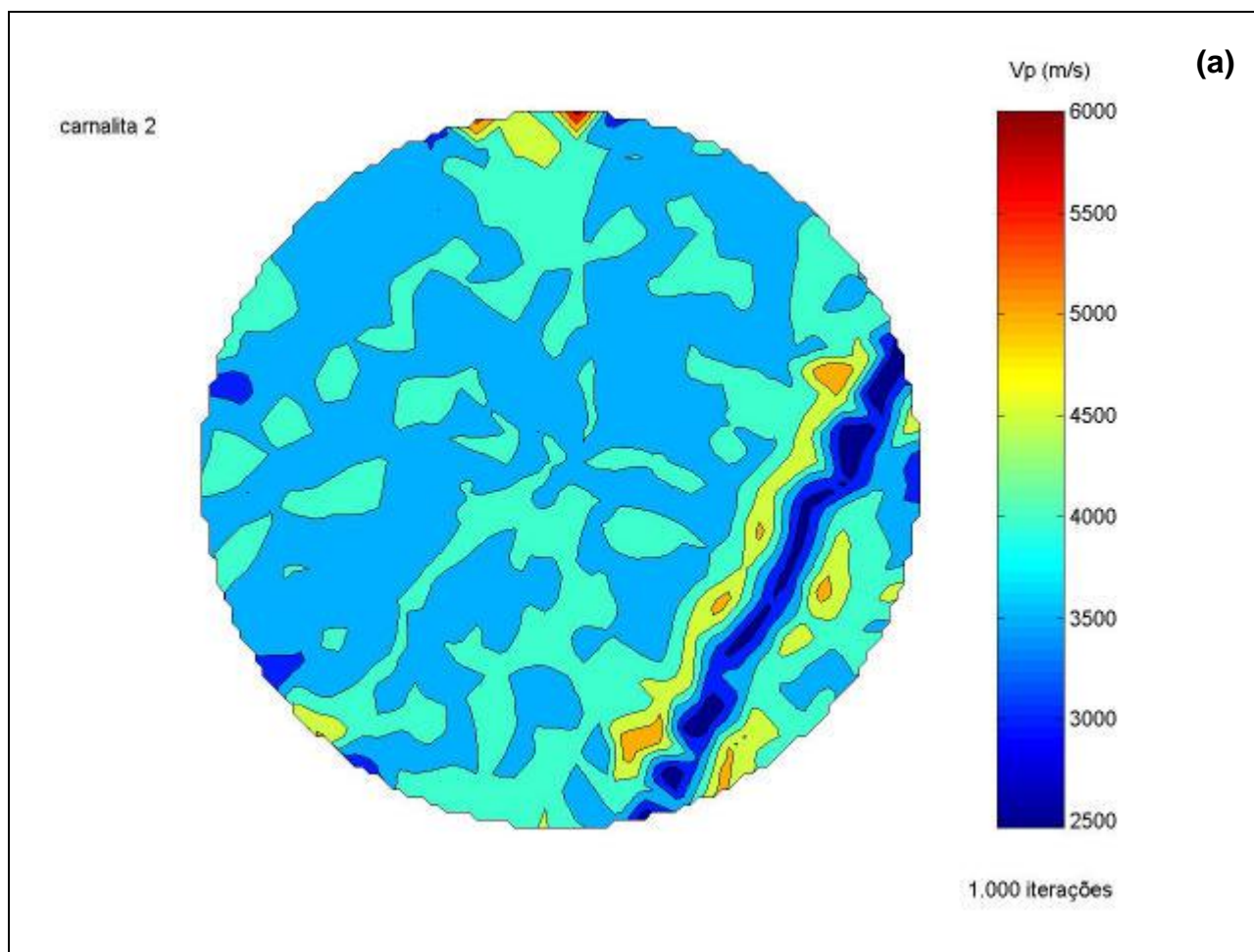
**Figura 5.2.4(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica da amostra carnalita 1. Velocidade predominante em torno de 4000 m/s e sem evidência de descontinuidade.



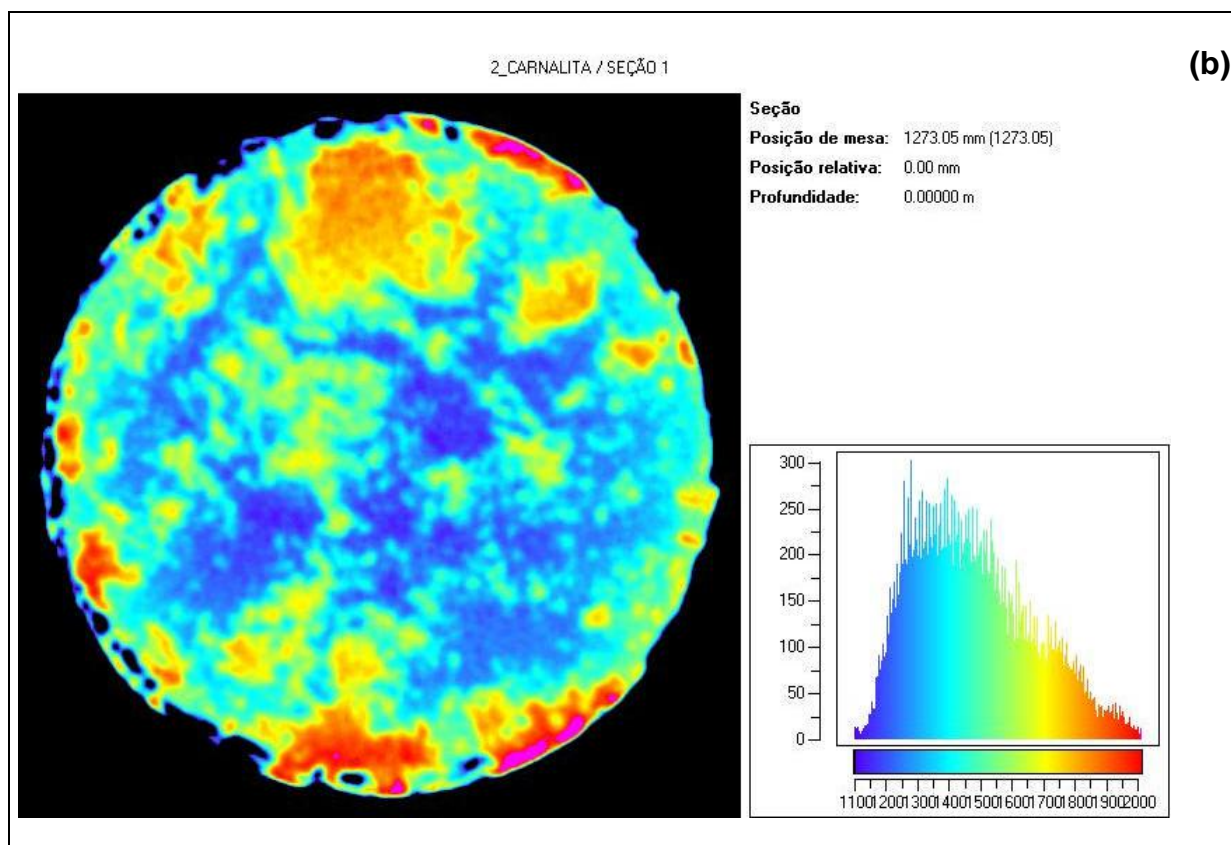
**Figura 5.2.4(b).** Imagem de tomografia de raios-x da amostra carnalita 1. Valores de densidade variando bastante, provavelmente refletindo uma heterogeneidade composicional da amostra (Soares, 2006).

O tomograma elástico da Figura 5.2.5(a) da carnalita (2) apresenta um evento linear com uma região central de baixa velocidade de onda P ( $\approx 2800$  m/s), contornada por bordas de alta velocidade ( $\approx 4700$  m/s). Fora desta região, observam-se zonas em que a velocidade predominante está em torno de 3500 m/s e outras cerca de 3800 m/s. De acordo com as velocidades registradas (e com a coloração da amostra, Figura 1.2) parece haver também nessa amostra uma mistura de carnalita (regiões avermelhadas e com menor velocidade) e halita (regiões esverdeadas e de maior velocidade), conforme discutido por Soares (2006). A imagem da tomografia de raios-x também não revelou descontinuidade presente na rocha conforme identificada no tomograma elástico (Figura 5.2.5(b)).



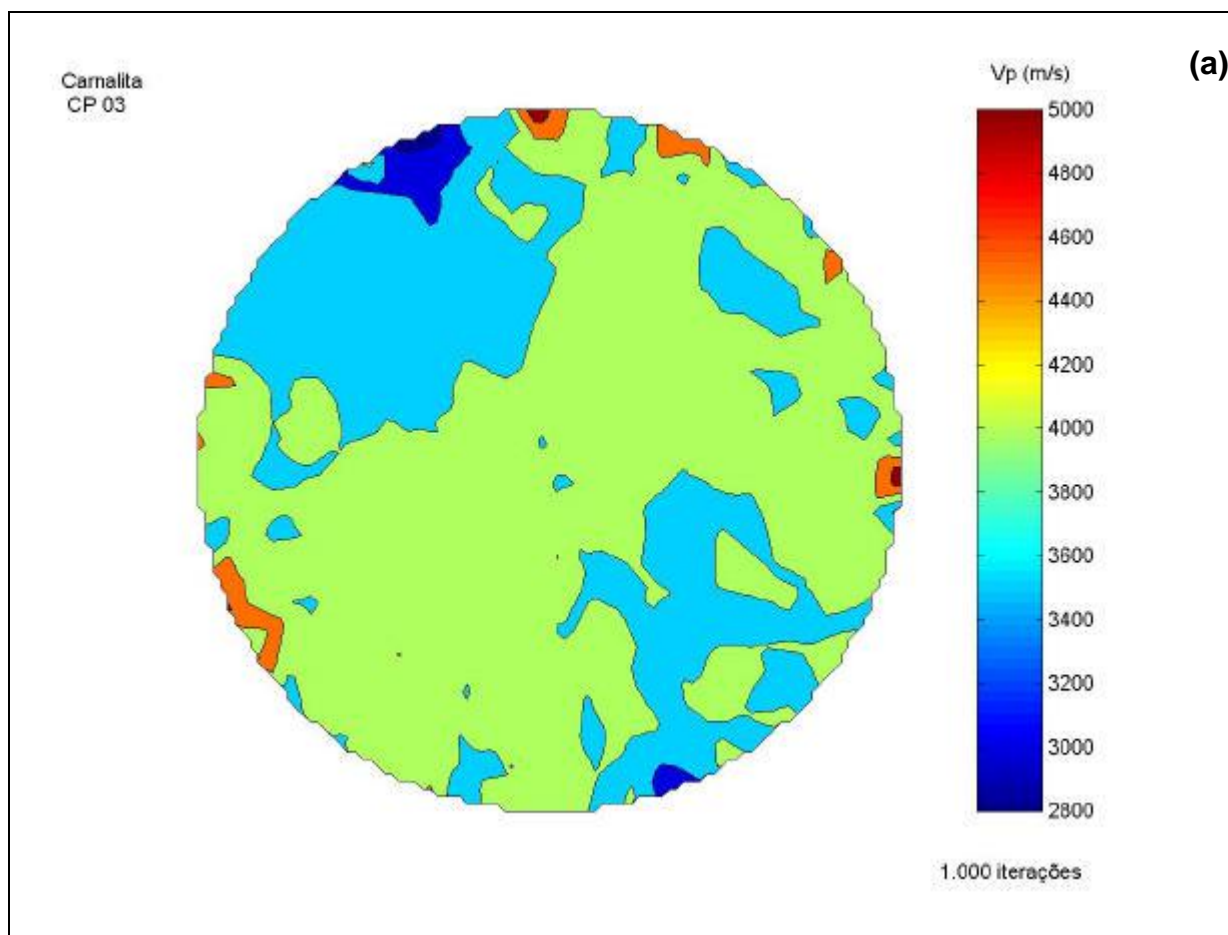


**Figura 5.2.5(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica com velocidades predominantes em torno de 3500 e 3800 m/s. Foi identificado um evento linear apresentando valores altos e baixos para a velocidade de onda P.



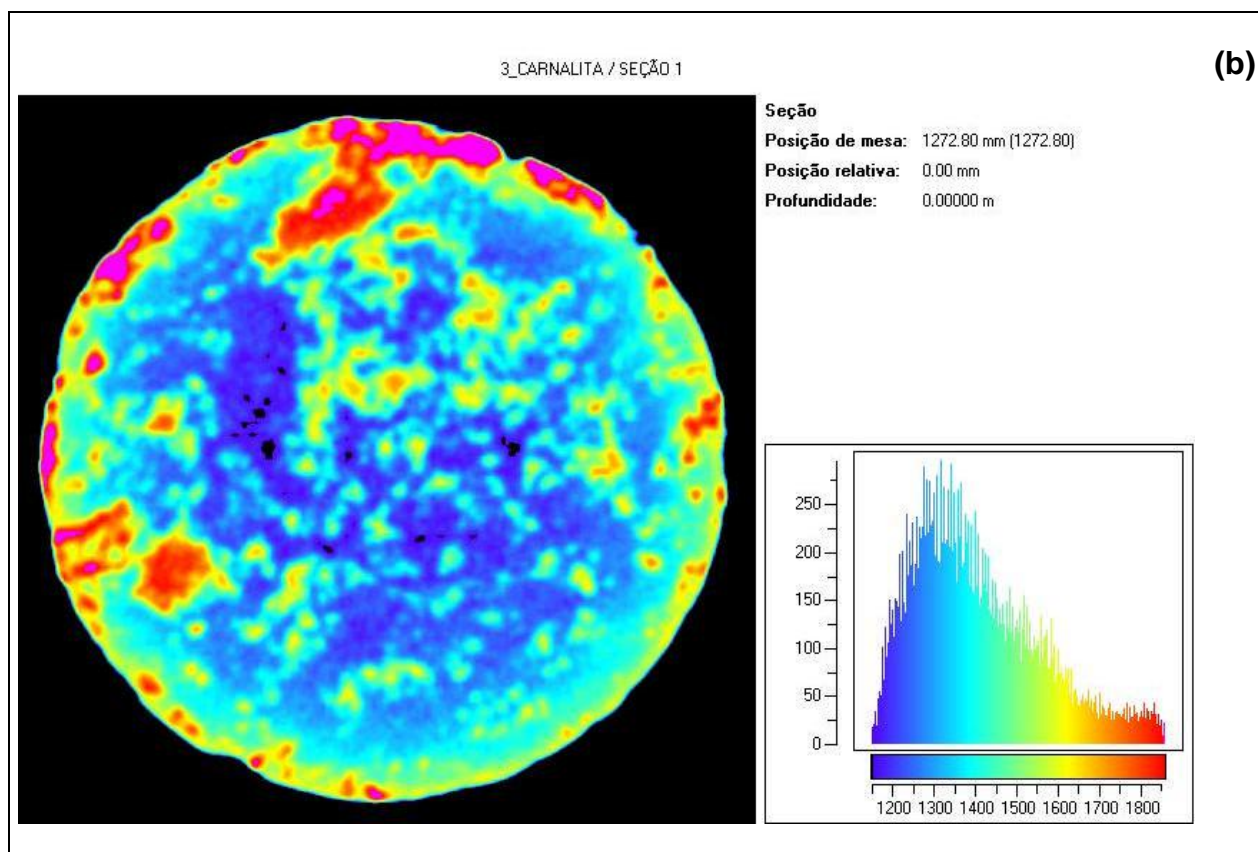
**Figura 5.2.5(b).** Tomografia de raios-x mostrando regiões da amostra da carnalita 2 que possuem valores bastante variáveis de densidade, sem apresentar nenhuma descontinuidade (Soares, 2006).

A Figura 5.2.6(a) apresenta duas zonas com velocidades distintas. A zona que se encontra na direção NE/SW possui velocidade de onda P em torno de 4000 m/s. A outra zona apresenta velocidade de onda P aproximada de 3500 m/s. Nas zonas em que possivelmente a halita predomina os valores de velocidades são mais altos, enquanto que nas áreas que predomina a carnalita os valores de velocidades são mais baixos, conforme discutido por Soares (2006). Nesta amostra não foram identificados eventos lineares de alta ou baixa velocidade. O correspondente tomograma de raios-x mostrou também uma variação substancial na composição da amostra, sem também identificar qualquer descontinuidade linear, mas mostrando a sua maior resolução através da identificação de diversos vazios milimétricos.



**Figura 5.2.6(a).** Imagem de tomografia ultra-sônica da amostra carnalita 3. Nota-se duas regiões com velocidades predominantes, uma em torno de 3500 m/s e a outra cerca de 4000 m/s.





**Figura 5.2.6(b).** Tomografia de raios-x da amostra carnalita 3 mostrando uma variação substancial da densidade e sua maior resolução pela identificação de vazios (Soares, 2006).

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos experimentos notou-se que as amostras de halita apresentaram velocidades elásticas maiores que as amostras de silvinita. Submetida a uma pressão de 100 psi, as velocidades da halita variaram entre 4316 m/s e 4409 m/s para ondas P e entre 2564 m/s e 2774 m/s para ondas S. Os valores de velocidade para a silvinita variaram entre 3484 m/s e 4005 m/s para ondas P e 2183 m/s e 2609 m/s para ondas S. Esses valores ocorrem em virtude da halita ser uma rocha mais pura e ter uma textura mais compacta. A silvinita, por outro lado, é uma rocha formada pela mistura de halita e silvita, provavelmente contém mais impurezas, e tem uma textura granular. Conseqüentemente, em virtude desses fatores, valores de velocidades de onda P e S mais baixos para silvinita em relação a halita são coerentes. Embora acredite-se que a silvita contribua para o decréscimo de velocidade em relação a halita pura, nesse trabalho a velocidade da silvita pura não foi medida nem foi encontrada nenhuma referência bibliográfica neste respeito.

As tomografias ultra-sônicas realizadas em testemunhos de halita e carnalita apresentaram velocidades de onda P compatível com os tipos litológicos, de acordo com as referências bibliográficas citadas neste trabalho. A carnalita mostrou que possui velocidades mais baixas que a halita. Por meio da análise dos tomogramas foram identificadas algumas feições lineares similares a zonas de fraturas. Essas zonas não foram detectadas nos tomogramas de raios-x. Como as propriedades elásticas são muito sensíveis a descontinuidades elas podem ser utilizadas justamente na identificação desse tipo de estrutura, diferente do método de raios-x (embora este apresente maior resolução).

As feições lineares encontradas nos tomogramas elásticos foram interpretadas como zonas pré-existent de fratura, em razão de tais rochas terem sido submetidas, provavelmente, a um campo de tensão que excedeu seus limites críticos de deformação. Como o ambiente de formação dos evaporitos propicia a formação de sais com composições variadas, sugere-se que tais zonas foram logo preenchidas por um fluido salino, possivelmente originado da mesma rocha, que por razões ambientais foi precipitado com propriedades elásticas diferentes.

De todos os tipos de rochas evaporíticas utilizados nos experimentos deste trabalho, o único litotipo que não apresentou bons resultados com o sistema de medição de velocidade uniaxial e a tomografia ultra-sônica foi a taquidrita. A razão sinal/ruído não nos permitiu identificar o tempo de chegada da onda, mas com o sistema de velocidade uniaxial à pressão hidrostática, utilizado no Cenpes, isso foi possível. A taquidrita apresentou a velocidade de onda P igual a 3200 m/s, mais baixa em relação a todos os outros litotipos (halita, silvinita e carnalita). Visto que a taquidrita tem 12 moléculas de H<sub>2</sub>O em sua composição, este fator deve ser um dos que corroboram para esse baixo valor encontrado para a velocidade de onda P.

Com as considerações abordadas acima podemos concluir que de todos os tipos litológicos de evaporitos analisados, a taquidrita é a que apresentou maior tendência de atenuar ondas elásticas em frequência ultra-sônica, de modo diferente em relação aos outros tipos litológicos estudados. Nos testes laboratoriais compreendemos que a halita, silvinita e carnalita não dificultam o imageamento de velocidades ultra-sônicas, a não ser pelo possível alto contraste de impedância com as rochas encaixantes. Estes resultados mostram que um dos sais mais absorvedores de energia das ondas elásticas, dependendo das condições de pressão a que se encontra submetido, é a taquidrita. Se esse fato permanece também em frequências sísmicas, pode-se dizer que dentre esses tipos litológicos, a taquidrita é a que mais contribui para a dificuldade de imageamento sísmico das camadas abaixo do sal.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP, 2006. Disponível em:

<[http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/secoes/sg\\_seal.PDF](http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/secoes/sg_seal.PDF)> 4 de Abril 2006

CARNALITA, 2006. Disponível em:

<<http://www.iec.es/institucio/societats/ICHistoriaNatural/Bages/geologia/Imatges%20Grans/ccarnal-lita.htm>> 21 de Fevereiro 2006.

CARTA, 2006. Disponível em:

<[http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/cartas/ce\\_sergipe.PDF](http://www.brasil-rounds.gov.br/geral/cartas/ce_sergipe.PDF)> 4 de abril 2006

CRISTESCU, N. & HUNSCHE, U., 1998. Time Effects in Rock Mechanics. Wiley & Sons, Chichester.

HALITA, 2006. Disponível em:

<<http://www.iec.es/institucio/societats/ICHistoriaNatural/Bages/geologia/Imatges%20Grans/ehalita.htm>> 21 de Fevereiro 2006.

HALOGENETOS, 2005. Disponível em:

<[http://www.unb.br/ig/cursos/Mineralogia1/03\\_halogenetos.pdf/](http://www.unb.br/ig/cursos/Mineralogia1/03_halogenetos.pdf/)> 29 de Setembro 2005.

MINERALES, 2005. Disponível em:

<[http://greco.fmc.cie.uva.es/imagenes\\_minerales/silvin6.jpg/](http://greco.fmc.cie.uva.es/imagenes_minerales/silvin6.jpg/)> 4 de Outubro 2005.

OLIVER, F.Z., 1997. Seqüência Evaporítica Ibura da Bacia de Sergipe, Revisão de Fácies Sedimentares, Paleoambientes Depositionais e Potencialidades na Geração de Petróleo e Potencialidades na Geração de Petróleo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da UFF, 145ps.

POPP, T. & KERN, H., 1998. Ultrasonic Wave Velocities, Gas Permeability and Porosity in Natural and Granular Rock Salt. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 23(3), p. 373 - 378.

- POPP, T. & KERN, H., 2000. Monitoring the State of Microfracturing in Rock Salt During Deformation by Combined Measurements of Permeability and P- and S Wave Velocities. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 25(2), p. 149-154.
- RICHTER, C., 1958. Elementary Seismology. W. H. Freeman y Co., EUA
- SCHLUMBERGER, 2006. Apostila sobre prospecção e desenvolvimento de campos de petróleo e gás (Schlumberger). Disponível em:  
<<http://acd.ufri.br/multimin/mmp/textos/cap2p/index.htm>> 14 de Março 2006.
- SILVA, M.A.M., SCHREIBER, B.C. & SANTOS, C.L., 2001. Evaporitos como recursos minerais. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 18(3), p.337-350.
- SZTMARI, P., CARVALHO, R.S., SIMÕES, I. A., TIBANA, P. & LEITE, D.C., 1974. Evaporitos de Sergipe, v.1, Projeto Evaporitos, SEM – Ba / SEPES, Aracajú, 159.
- SOARES, A. J., 2004. Ultrasonic tomography in cores. Abstracts of the 66<sup>th</sup> EAGE Conference. Paris, France. Paper G007.
- SOARES, A. J., 2005. Projeto e construção de um tomógrafo ultra-sônico para testemunhos. *Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Disponível em:  
<<http://www.geologia.ufri.br/petrofisica/downloads/Publicacoes/artigos/ConstrucaoTomografo.pdf>> 10 de Maio de 2006.
- SOARES, A. J., 2006. Anisotropia elástica induzida por tensões e heterogeneidades: Análise por tomografia ultra-sônica de testemunhos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- TACHYHIDRITE, 2006. Tachyhidrite Mineral Data. Disponível em:  
<<http://webmineral.com/data/Tachyhydrite.shtml>> 21 de Fevereiro 2006.

WARREN, J. K., 1989. Evaporite Sedimentology. Importance in Hydrocarbon Accumulation. Prentice Hall, 285 ps

XU, S. & KING, M. S., 1989. Shear-wave Birefringence and Directional Permeability in Fractured Rock. Sci. Drill., 1, 27 – 33.